

國立臺灣師範大學體育學系
博士學位論文

網球拍纖維材質與排列角度
對擊球反應之分析

The Impact Analysis of Tennis Rackets Varied with
Material Composition and Fiber Arrangement

研 究 生：陳帝佑
指 導 教 授：林德嘉 博士
共同指導教授：劉 宇 博士

中華民國九十一年七月
中 華 民 國 臺 北 市

網球拍纖維材質與排列角度對擊球反應之分析

研 究 生：陳帝佑
指 導 教 授：林德嘉 博士
共同指導教授：劉 宇 博士

中文摘要

本研究的主要目的在探討不同網球拍纖維材質與排列角度之振動特徵，並藉由實際握拍方式分析手腕部位所受振動的影響，與反彈球速的差異。實驗中採用八種網球拍，其碳纖維和玻璃纖維比分別為 1 : 0、6 : 1、5 : 2 和 4 : 3，並分別搭配纖維角度 22 度和 30 度之網球拍為主要測試的對象，每支網球拍的重量、網線張力和平衡點皆控制在相同的條件下，進行網球撞擊的測試。振動測試是以 Biovision 的訊號處理系統和一個 Biovision (50g)、一個 BioPAC (500g) 的加速規進行數據的採集，採樣頻率為 10000Hz，網球的撞擊速度約為 28m/s；反彈球速比是以高速攝影機收集每次撞擊過程的運動學資料，拍攝頻率為 1000Hz。研究結果發現，球和球拍的撞擊過程中，球拍纖維角度 30 度時之振幅較 22 度小，且網球拍含碳纖維比例越多，球拍結構體之最大振幅值越小，因此在撞擊過程中球拍損耗較少之力學能，所以有較大的反彈球速比；然而球拍含碳纖維比例越多，對於持拍手腕卻有較大之振幅反應，且手腕測得之對數衰減率亦較大，這反映出手腕承受大部分振動波的能量，因而增加了持拍手臂的負荷，故長時間使用將造成運動員之疲勞反應提早發生。

關鍵詞：網球拍、纖維材質、纖維角度、振動

The Impact Analysis of Tennis Rackets Varied with Material Composition and Fiber Arrangement

Doctoral Graduate Student: Chen, Ti-Yu

Advisor: Lin, Der-Chia Ph. D.

Co-Advisor: Liu, Yu Ph. D.

ABSTRACT

This study aimed at analyzing the vibration of various tennis rackets, which were composed by the mixture of carbon fiber and glass fiber. This study was also to investigate how the wrist joint of the player and rebounding velocity of the ball from each racket were affected by the vibration of the racket. There were eight different kinds of tennis racket, composed by mixing carbon fiber and glass fiber in the ratio of 1 to 0, 6 to 1, 5 to 2, and 4 to 3. The angles of the fiber were arranged in 22 degrees and 30 degrees with respect to the longitudinal axis. The rackets had the same weight, string tension and balance. In this study, one experiment was to monitor the vibration in the grip of every tennis racket and in the wrist joint of participant. The other experiment was to distinguish the coefficient of restitution between the ball and everyone of eight different rackets.

Two accelerometers (1000 Hz) and Biovision system were attached to each racket to acquire the vibratory signals. The impact of the tennis ball was set in the velocity of 28 m/s or so. Peak Motus system with one high-speed video camera (1000 Hz) was used to record the kinematics data and to calculate the coefficient of restitution between the ball and racket. The selected variables in the experiments were tested by two-way ANOVA at $\alpha=.05$ significant level.

The results of this study indicated that the racket had lower value of max vibratory amplitude for fiber angle at 30 degrees than at 22 degrees. The value of max amplitude on tennis racket grip was significantly decreasing as the content of carbon fiber in the racket was increasing. Therefore, more the component of carbon fiber, the tennis racket would lost less mechanical energy, and had higher coefficient of restitution between the ball and racket. One the other hand, however, the amplitude and the ratio of logarithmic decrement were significantly increasing on the wrist joint as the content of carbon fiber in the racket was increasing. Consequently, this phenomenon indicated that the wrist joint would absorb more vibratory energy from racket made by pure carbon fiber. Thereby, the player would bear extra load in the arm and affect his/her performance in long term consideration.

Key words: racket, material, fiber angle, vibration

謝 誌

本論文能順利完成，非常感謝指導教授林德嘉博士與劉宇博士的悉心指導，以及口試委員王金成博士、洪得明博士、相子元博士、黃長福博士和蔡虔祿博士等人，以豐富的學養，提供具體且寶貴的意見，使學生受益良多，在此致上深深的謝意。

實驗期間，特別感謝江勁彥同學、許太彥同學與兄長陳重佑的協助，更感謝源民安公司的鼎力配合；在研究所學習的這段日子，黃憲鐘同學、王思宜同學、王令儀同學、李靜雯同學和孫媽媽等人的鼓勵，在此一併致謝。

最後，將本論文與我學習成長的成果，獻給我摯愛的父母，以感念您們為了孩子們的成材用盡半生辛勞，願與您們共同分享這份喜悅與榮耀。

陳帝佑 謹誌
2002 年七月

目 次

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
謝誌.....	III
目次.....	IV
圖次.....	VII
表次.....	VIII

第壹章 緒論.....	1
-------------	---

第一節、前言.....	1
第二節、問題背景.....	2
第三節、研究目的.....	6
第四節、研究範圍與限制.....	7
第五節、名詞解釋與操作性定義.....	9

第貳章 文獻探討.....	11
---------------	----

第一節、網球拍支撐點的作用對擊球效果之探討.....	11
第二節、網球拍結構體之物性對擊球反應的研究.....	14
第三節、網球拍振動反應影響運動表現之探討.....	17

第四節、結語.....	21
第參章 研究方法與步驟.....	23
第一節、研究對象.....	23
第二節、實驗儀器與設備.....	24
第三節、實驗時間與地點.....	25
第四節、實驗步驟.....	26
第五節、對數衰減方程之理論基礎.....	30
第六節、資料處理.....	37
第肆章 結果與討論.....	39
第一節、不同材質網球拍的振動特性分析.....	39
第二節、不同材質網球拍造成持拍手腕關節的振動反應.....	51
第三節、不同材質網球拍對反彈球速比的影響.....	62
第四節、綜合討論.....	69
第伍章 結論與建議.....	74
引用文獻.....	77
一、中文部份.....	77

二、外文部份.....	78
附錄一：纖維角度 22 度搭配 57%碳纖維球拍之撞擊測試資料.....	83
附錄二：纖維角度 22 度搭配 71%碳纖維球拍之撞擊測試資料.....	84
附錄三：纖維角度 22 度搭配 86%碳纖維球拍之撞擊測試資料.....	85
附錄四：纖維角度 22 度搭配 100%碳纖維球拍之撞擊測試資料.....	86
附錄五：纖維角度 30 度搭配 57%碳纖維球拍之撞擊測試資料.....	87
附錄六：纖維角度 30 度搭配 71%碳纖維球拍之撞擊測試資料.....	88
附錄七：纖維角度 30 度搭配 86%碳纖維球拍之撞擊測試資料.....	89
附錄八：纖維角度 30 度搭配 100%碳纖維球拍之撞擊測試資料.....	90

圖 次

圖 3-1、球拍撞擊過程中，力量傳感計與加速規之訊號示意圖.....	28
圖 3-2、實驗儀器架設連線圖.....	29
圖 3-3、質點處於有阻尼之振動系統簡圖.....	31
圖 3-4、過阻尼系統之位置函數圖.....	33
圖 3-5、臨界阻尼系統之位置函數圖.....	34
圖 3-6、低阻尼系統之位置函數圖.....	35
圖 4-1、實驗所採集到之振動波訊號.....	40
圖 4-2、八種網球拍在拍面中心、上端和下端之撞擊時，拍柄位置 最大振幅之曲線圖.....	43
圖 4-3、八種網球拍在拍面中心、上端和下端之撞擊時，拍柄位置 對數衰減率之曲線圖.....	48
圖 4-4、八種網球拍在拍面中心、上端和下端之撞擊時，手腕位置 最大振幅之曲線圖.....	54
圖 4-5、八種網球拍在拍面中心、上端和下端之撞擊時，手腕位置 對數衰減率之曲線圖.....	59
圖 4-6、八種網球拍在拍面中心、上端和下端之撞擊時，反彈球速比 曲折線圖.....	67

表 次


表 4-1、八種網球拍在拍面中心、上端和下端之撞擊時，拍柄位置的 最大振幅平均數和標準差.....	42
表 4-2、八種網球拍在拍面中心撞擊時，拍柄位置最大振幅之單純主 要效果變異數分析摘要表.....	44
表 4-3、八種網球拍在拍面上端撞擊時，拍柄位置最大振幅之單純主 要效果變異數分析摘要表.....	44
表 4-4、八種網球拍在拍面下端撞擊時，拍柄位置最大振幅之單純主 要效果變異數分析摘要表.....	45
表 4-5、八種網球拍在拍面中心、上端和下端之撞擊時，拍柄位置的 對數衰減率平均數和標準差.....	47
表 4-6、八種網球拍在拍面中心撞擊時，拍柄位置對數衰減率之單純 主要效果變異數分析摘要表.....	49
表 4-7、八種網球拍在拍面上端撞擊時，拍柄位置對數衰減率之單純 主要效果變異數分析摘要表.....	49
表 4-8、八種網球拍在拍面下端撞擊時，拍柄位置對數衰減率之單純 主要效果變異數分析摘要表.....	50
表 4-9、八種網球拍在拍面中心、上端和下端之撞擊時，手腕關節部 位的最大振幅平均數和標準差.....	53

表 4-10、八種網球拍在拍面中心撞擊時，手腕關節部位最大振幅之單純主要效果變異數分析摘要表.....	55
表 4-11、八種網球拍在拍面上端撞擊時，手腕關節部位最大振幅之獨立樣本二因子變異數分析摘要表.....	55
表 4-12、八種網球拍在拍面下端撞擊時，手腕關節部位最大振幅之單純主要效果變異數分析摘要表.....	56
表 4-13、八種網球拍在拍面中心、上端和下端之撞擊時，手腕關節部位的對數衰減率平均數和標準差.....	58
表 4-14、八種網球拍在拍面中心撞擊時，手腕關節部位對數衰減率之單純主要效果變異數分析摘要表.....	60
表 4-15、八種網球拍在拍面上端撞擊時，手腕關節部位對數衰減率之單純主要效果變異數分析摘要表.....	60
表 4-16、八種網球拍在拍面下端撞擊時，手腕關節部位對數衰減率之單純主要效果變異數分析摘要表.....	61
表 4-17、八種網球拍在拍面中心、上端和下端之撞擊時，反彈球速比之平均數和標準差.....	63
表 4-18、八種網球拍在拍面中心撞擊時，反彈球速比之獨立樣本二因子變異數分析摘要表.....	63
表 4-19、八種網球拍在拍面上端撞擊時，反彈球速比之獨立樣本二因子變異數分析摘要表.....	65

表 4-20、八種網球拍在拍面下端撞擊時，反彈球速比之單純主要效果 變異數分析摘要表.....	66
--	----

第壹章 緒論

第一節、前言



近半個世紀以來，人類在運動領域的成就是大家有目共睹的，這些成就歸功於運動與科技的緊密結合，其中包括訓練方法的改進、運動科技研究以及運動器材功能的提昇與創新等等，造就了如此非凡的成果。在使用運動器材之運動項目中，運動器材的設計成為運動表現優劣的一大關鍵，而網球運動即是必須藉助運動器材的運動；基於這個因素，在網球技術水準趨於某一水平時，運動器材與輔助器材的研發、改進及使用，諸如：網球拍、網線、避振器、球鞋、衣物...等用具的選用，即成為影響運動表現的關鍵要素。

而在眾多網球相關的器材因素中，由於網球拍為聯繫運動選手與球之間的首要工具，因此網球拍的選擇，乃是所有網球裝備中最重要的一環；隨著科技的快速進步，網球拍本體使用的材質從早期的木

製、鋁合金等天然的複合材料，一直發展到今日人工合成之複合材料的蓬勃應用，其理由不外乎是人工合成之複合材料本身具有質地輕、高彈性、高強度等優點，這皆是天然複合素材所達不到的物性。是故，網球拍設計的功能性與安全性，就成為左右運動表現優劣之一大關鍵。

網球拍對網球之需要，不外乎是使人能藉此來獲得最佳的擊球狀態，所以，運動員為了通過球拍與來球產生心靈和技術的契合，網球拍的材質與結構設計問題就變得越來越重要。

第二節、問題背景

由於人工合成之複合材料的蓬勃應用，現今網球拍的設計發展，明顯地往質量輕、高回復係數以及低振動...等方向著手改良。Hennig (2001) 認為網球拍有幾個性質會與精準擊球的速度有關，這些性質分別為網球拍框的勁度、球拍面的幾何形狀、網線材質的種類以及網線的張力等；透過多重實驗顯示，運動員的成績表現不僅僅仰賴臨場比賽的生理與心理狀態，更反映在他們所使用之網球拍的基本

機械特徵上。

長期從事網球相關研究的學者 Elliott (1982) 指出球拍框的拍面積大小、幾何形狀及材質種類，皆會影響擊球後之反彈球速和球的轉動慣量。由 Brody (2000) 的研究顯示，現今網球拍的最大演變在於材質的選用與拍框內部結構的創新設計，這相較於早期球拍之低勁度與質量過重所展現出的擊球效果，皆有迥然不同的差別；究其原因乃在於勁度高的網球拍比勁度低的網球拍產生的反彈球速快，主要機制為勁度高的球拍與球的撞擊過程中，球拍結構體在變形之際改變量較少，相對球之能量損失較少，故自勁度高的球拍反彈回來的速度便會較高，而勁度低的球拍，因形變量較大，會失去較多的能量，而這些能量不會再傳回到球上；再者，球拍質量過重的結果，將降低揮拍之拍頭速度，故減少其動量，所以就減慢了反彈球速。

而根據 Groppe、Shin、Thomas 和 Welk 等人 (1987) 採用不同張力、結構及材質的球線，探討其造成之反彈球速的差異，亦指出其對擊球過程和球拍框的振動模態皆有相當大的影響；此一結果與林寶成 (1997) 分析有、無穿線於球拍框上，對球拍框主體的振動模態會有差異的結果有相同的說法。相子元 (1998) 也指出，網線的振動對

球拍與碰撞過程均可造成極大的影響，若球停留在網線的時間與網線振動半個週期相同，則可達到較完整之能量轉換，使球達到最高之反彈速度，若非如此，則網線亦將振動傳送至球拍框，造成球拍框的振動。

日來，Brody (1995)、蘇榮立 (1996) 以網球拍勁度和網線張力的觀點，探討此二因素在不同組合下，對控球與反彈球速的影響，結果指出勁度高和網線磅數高的球拍在控球上及反彈球速上，會比勁度低和磅數低的球拍有助於控球及球速的表現，然而後者在實驗過程中，並未對球拍的其他邊界條件作標準化。對於球拍的勁度而言，林寶城 (1997) 從網球拍模態之固有頻率的觀點，發現勁度越大的球拍框，越有利於擊球的反彈球速，而網線與拍框間阻振設備的使用，可以阻隔部份因碰撞引起的振動力量，使得傳遞至拍柄之振動減少，進而降低持拍手臂的負荷，因此球拍框之振動可直接影響人體之舒適與安全。

由研究文獻的回顧中，我們得以瞭解，以往大部分的研究多偏向於球拍主體勁度與反彈球速的研究，而對於球拍材質與結構問題造成振動變化的研究，則相當少見。事實上，網球拍的材質種類與纖維

疊層角度對球拍的勁度與振動有很大的關係(Hennig , 2001 ; 蘇榮基 , 1999) ; 這可從 Chen (2000) 以不同材質網球拍的振動研究中看出 , 因複合材料中纖維的種類和比例有所不同 , 其構成網球拍結構體的變化也就不同 , 故在撞擊後所引起振動的特徵也就有所差異。

種類繁多的人工合成複合材料中 , 例如玻璃纖維、碳纖維、硼纖維和醃胺纖維...等 , 由於碳纖維兼具質量輕、強度高及剛度強的優越特性 (Smith , 1994) , 而玻璃纖維具有質量較重且纖維剛性小的特性 , 然而其價格較為便宜 , 因此 , 玻璃纖維和碳纖維二者是目前業界最常混合使用來製造網球拍的人工合成複材。可是 , 此二種人工合成複材的最佳合成比例與纖維的排列角度 , 往往是製造業者莫衷一是的問題所在 , 更遑論其造成的振動響應及對運動員的影響。

依據上述的研究 , 網球拍材質的使用 , 確切地影響其回擊球速、控球與人體負荷的種種問題。可是 , 研究中常常缺乏網球拍本體組成結構的相關研究 , 然而其組成的材質與結構才是真正決定網球拍力學特徵的根本問題。所以 , 本研究將藉由先前網球拍材質之振動研究為基礎 , 並加附以不同纖維的排列角度 , 以深究網球拍振動的變化與擊球效果間相互影響的機制 , 更進而瞭解球拍之振動影響手腕動作行為

的過程，實具有重要的意義。

第三節、研究目的

本研究的主要目的是藉由改變網球拍之人工合成纖維種類和纖維的排列角度，並透過人體實際握拍的振動實驗分析，探討網球拍之纖維種類與其纖維排列角度對網球拍結構體振動特徵和反彈球速的影響，並進一步分析網球拍振動造成持拍手腕振動的特徵。

研究中所採集的資料有：

- 1、透過網球拍之各種搭配組合在第一模態之振動訊號和手腕關節之訊號，採集各振動波之最大振幅和第二振幅峰值；
 - 2、採集高速攝影機所拍攝網球撞擊球拍面時之入球速和出球速，並計算網球之反彈球速比（恢復係數）；
 - 3、以對數衰減方程計算該振動波之對數衰減率；
- 以作為分析之基本依據。

第四節、研究範圍與限制

1. 網球拍的材質種類很多，現今的趨勢主要是針對人工合成複合材料上進行研發，其中最常被利用的強化材為碳纖維和玻璃纖維(陳帝佑，1998；蘇榮基，1999)，而基材是採用環氧樹脂為主；本研究使用的網球拍結構體是由七層纖維疊加而成，其中碳纖維和玻璃纖維之混合疊放比例為 7：0、6：1、5：2 和 4：3。在纖維排列角度的選取上，纖維角度越小（與球拍長軸之夾角），球拍結構體的強度越大，但是結構體在線孔附近之抗剪力較小，因而極易造成結構體損壞，且因製作成型過程中，纖維角度越小，較容易產生拍框面內緣纖維擠壓而形成皺摺的現象。所以本研究以單方向之纖維預浸布為主，並附以業界較常用之 22 度和 30 度之纖維角度，對於其他材質種類與纖維排列角度並非本研究探討之範圍。
2. 本研究應用網球拍作為研究對象，探討網球拍之材質與纖維排列角度對球拍本體、持拍手腕振動和反彈球速比的影響，而有關於影響振動的其他因素，並非本研究探討的範圍。

3. 市售發行的球拍造型不盡相同，本研究僅以 Dunlop 牌之 200G-Midsize 系列造型之網球拍框為主，並搭配實驗設計的材質種類和纖維排列角度，作為研究對象。
4. 本研究所使用之網球拍線皆以 Dunlop 牌之專用尼龍線，網線橫斷面直徑為 1.35mm，並控制其網線張力在 60 磅（27kgs），而球拍總重為 310g，平衡點為 33cm（距拍柄端），轉動慣量為 $0.0305 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ，勁度值控制在 55 ± 3 單位。
5. 本研究以全新 Dunlop 牌 Fort 系列的網球作為撞擊測試用球。
6. 網球的基本動作有發球、抽球和截擊等，本實驗設計中，為了減少動作可能干擾研究結果的因素，故實驗參加者是採用類似截擊的動作，擊球前並無拉拍或向前送拍的現象，並以大陸式握拍法作為撞擊測試的持拍準備動作。

第五節、名詞解釋與操作性定義

1. 材質 (Material) :

構成網球拍框結構體之強化材種類。本研究所使用的材質是以碳纖維與玻璃纖維混合疊放比為 1:0、6:1、5:2 和 4:3 的比例，作為測試比較對象。

2. 纖維角度 (Fiber Angle) :

指構成網球拍結構體強化材之纖維與拍柄長軸間的夾角。本研究採用碳纖維與玻璃纖維不同混合比例疊層的網球拍，並分別配以與拍柄長軸成 22 和 30 度之纖維排列角度做為研究測試的對象。

3. 對數衰減率 (Logarithmic Decrement Ratio) :

對於一個有阻尼的振盪系統而言，相鄰振動波的比值再取對數，稱之為『對數衰減率』(Marion & Thornton, 1995)。本研究的對數衰減率乃是藉由加速規所收集到的訊號曲線，經修勻並計算後所獲得，而同一材質與纖維角度之網球拍的對數衰減率，是網球以約 28m/s 的速度，正向撞擊網球拍面三個標誌點各十次的平均值。

4. 振動模態 (Vibration mode) :

指結構體與生俱來的特性，每一個振動模態包含振動固有頻率 (Natural frequency) 和模態 (Mode shape)，對一具有 K 個自由度的結構體，必然有 K 個振動模態。若將此結構體之運動方程式列出，則此運動方程式的特徵向量就是此結構體之振動模態。(林寶城，1997)

第貳章 文獻探討

評定網球拍整體架構之特質，可從球拍之拍形、重量、球拍之勁度與擊球時所引起球拍之振動等方向著手，本章針對影響網球拍結構體之基本特性，及其影響使用者擊球表現的因素，加以國內外所有相關的文獻做概略性的討論，在此將依研究的相關性分為四個部份加以探討：第一節、網球拍支撐點的作用對擊球效果之探討；第二節、網球拍結構體之物性對擊球反應的研究；第三節、網球拍振動反應影響運動表現之探討；第四節、結語。

第一節、網球拍支撐點的作用對擊球效果之探討

由於人體輸出的能量是藉由前臂傳輸至球拍，再經由碰撞將能量轉換成球之動能，有基於此，手掌是唯一聯繫人體動作與網球拍之間的首要橋樑，所以手掌緊握球拍柄的程度，左右著網球拍之擊球表現。於是，Baker 和 Putnam (1979) 便藉由球拍和球之碰撞情形，進

而瞭解緊握球拍程度對碰撞後反彈球速的影響；在其實驗中，使用兩種方式來固定網球拍，即固定鉗夾方式和球拍握把端自由站立方式來進行網球撞擊測試，實驗結果發現，以固定鉗夾和球拍握把端自由站立兩種方式，在與球碰撞的過程中，球拍給予球之衝量皆相同，所以撞擊後的反彈球速並無顯著差異。

在同一時期，Brody（1979）亦研究支撐球拍模式對反彈球速的影響，其結果也指出，水平緊握和自由站立二種方式的網球拍在與球碰撞後，球之撞擊前後的球速比，並無顯著的差異。至此，可以看出，緊握球拍的程度並沒有影響反彈球速。

爾後，Elliott（1982b）以六種傳統木質的網球拍，研究緊握球拍的結果是否會對反彈球速造成影響。經實驗發現，當網球撞擊在球拍面甜區（sweet spot）時，緊握球拍的結果並沒有增加反彈球速，但是當網球撞擊在球拍面甜區以外時，增加緊握球拍的程度，可加快反彈球之速度。此結果與先前 Baker 等人的論點不盡相同，究其主要的原因乃是在早期的研究中，僅針對網球拍拍面的甜區做撞擊，對於非甜區的部份，並沒有多加考量，所以才下了如此片面的結論，殊不知在一般網球的打擊過程中，打到非甜區的狀況是時常發生的，而這皆

會影響到接連幾個擊球的結果。

接著 Grabiner、Groppel 和 Campbell (1983) 更進一步證實了以緊握球拍和球拍自由站立方式，在球拍面中心處作撞擊的反彈球速沒有顯著差異。近幾年來，Hatze (1993) 從能量的觀點，推導出球拍和球作用系統的能量平衡數學模式，由其模式的結果，也同樣說明了外在回復係數和球拍緊握程度沒有顯著相關，此結論相似於 Goodwill 和 Haake (2000) 以剛體動力學方法所推導出來的結果，然而他們推導球拍面與球碰撞模式的前提，皆已假定球拍和手之間並無任何能量損耗，這與實際情形仍有些許誤差。

由此可看出，過度地緊握球拍對打擊力量沒有絕對性的幫助，適度握緊球拍的目的，儘是藉以固定住球拍，以便將身體能量有效率地傳輸至球拍 (Groppel, 1992)，要增加擊球之球速，仍需透過身體各肢段之動作來配合，以做出完整之動力鏈，不僅僅是增加緊握球拍的度而已。

第二節、網球拍結構體之物性對擊球反應的研究

網球拍材質的演進，由早期的天然木製網球拍到現今的人工合成複合材質網球拍，其間重大之轉變在於球拍勁度和重量的變化；Brody（1995）指出，球拍框的設計是網球拍最基本的架構，它所代表的是網球拍功能的基礎，因此呈現出不同的擊球效果；諸如網球拍面和拍框橫斷面的幾何形狀、球拍的勁度及球拍的質心和重量等，皆會影響網球拍的擊球特性。而 Groppe（1992）與麥吉誠（1992）皆認為網球拍勁度的增加，對網球比賽的型態和打法起了革命性的轉變；由於球拍勁度提高，使得球與球拍接觸時，減少了能量的損耗，所以球能獲得更多的能量以轉換成動能，因此增加了球速，進而加快比賽的節奏，間接使運動員改變了打法與戰術。

早期 Baker 和 Wilson（1978）探討網球拍勁度和網線張力對撞擊後球速的影響，經由實驗發現，網球拍勁度和網線張力有顯著的交互作用，在當時以中勁度和低勁度的球拍，穿以 50 磅之網線張力時，網球具有較高之反彈係數，但高勁度的球拍受網線張力的影響並不明顯；換言之，網球拍結構體位移較小者比位移較大者，在與球碰撞後，會具有較高之反彈球速。次年，Brody（1979）亦在其研究中指出，

高勁度的球拍柄在與球碰撞之際，球拍柄之變形較少，所以能量損失較少，因而有較快之反彈球速，反之，低勁度的球拍柄其反彈球速較慢；由 Brody 與先前 Baker 和 Wilson 的研究結果發現，他們對網球拍勁度與反彈球速間的觀點，有許多異曲同工之妙。

網球拍的發展到了 80 年代以後，進入了一個新紀元。此時，研究網球拍之文獻相繼出爐，Elliott (1982a) 採用六種木質球拍，以探討球拍勁度與反彈球速的關係，在其研究中，將這六支球拍分成低勁度、中勁度與高勁度等三種不同勁度等級的球拍，結果發現高勁度的網球拍，在網線張力由 55 磅增至 75 磅時，網球之反彈係數並沒有顯著差異，而中和低勁度的球拍在網線張力 55 磅時，球具有較高之反彈係數。接著 Missavage 和 Baker (1984) 從實驗中有了量化的發現，即增加球拍之勁度，使得球碰撞前後之球速比值從 0.36 增加至 0.42，顯著地增加了 17%。隨後，Groppe (1984) 開始選用人工合成之玻璃纖維、碳纖維和硼纖維等高剛性的複合材質網球拍作為實驗對象，發現網球拍之勁度因受這些補強材的影響，進而增加了球拍結構體之勁度；然而，他對於鋁質球拍的見解就不盡相同了，其認為鋁質球拍的勁度，取決於拍型結構的設計，與材料並沒有關係；不過，對於鋁質球拍框橫斷面的因素並未考量，因此關於這個論點的真實性，仍有

相當大的爭議。

近幾年來，Hatze (1993)、Goodwill 和 Haake (2000) 與 Cross (2000) 更進一步從能量的觀點，以解釋網球拍之勁度和能量損耗的關係，藉由導出球拍和球作用系統的能量平衡數學模式，從式中得知，網線方面所消耗的能量只佔總能量損耗的極少部分，而主要能量損耗是因球與球拍接觸時，球拍結構體的作用所造成的。

由 Hatze、Goodwill 等人與 Cross 的研究發現，其結果可與先前幾位學者之研究相呼應，他們共同的論點皆認為勁度較高的網球拍在與球碰撞的過程中，球拍本身之形變量比勁度低的球拍少，而透過他們推導出的能量平衡數學模式看來，由於勁度高的球拍形變量較少，所以有較少的能量損失，因而提供給反彈球較多的能量以轉換成動能，故反彈球有較高之恢復係數；相反的，勁度低的網球拍，在與球碰撞的過程中，球拍框結構體內部損耗了較多的能量。

而 Brody (1995) 指出，球與球拍在接觸時期，網線扮演類似彈簧的角色，網線所消耗的能量極少，僅有 5% ~7% 左右，因此高勁度的球拍在附以高磅數之網線張力時，整個網線表面之形變量減少了，

因而網線儲存了較少之彈性能，故施予球的能量減少，也就降低了反彈球之球速；然而從控球觀點來說，高磅數的網線則有利於控球；至於網線斷面的粗細，則因較細的網線有較低之彈性模數，可使網線面有較大之變形量，因而能儲存較多之彈性能，而給予反彈球較高之球速。國內學者蘇榮立（1996）探討不同勁度網球拍與不同網線張力的組合對恢復係數、控球及球速的影響，實驗中採用勁度為 50、55、60、70 單位之四種網球拍，並搭配 40、50、60 和 70 磅之網線張力，結果呈現出球拍勁度和網線張力間的關係，即勁度高和磅數高的網球拍在控球及球速上，會比勁度低和磅數低的網球拍，有助於控球及球速的表現。

從 Brody 的說法對照蘇榮立的研究結果，可彙整出球拍勁度與網線張力間的關係，亦即問題的癥結主要還是回歸在球拍框結構體上，畢竟網線部分所能影響的能量儘是極少部分。

第三節、網球拍振動反應影響運動表現之探討

網球拍的振動現象是最直接影響手握球拍的感受與舒適度的評

比，這由於振動的能量勢必由持拍的手臂來吸收，因此網球拍的振動程度也就關係到手臂的負荷，進而影響到擊球的表現。研究網球拍之振動反應的文獻中，Elliott、Blanksby 和 Ellis（1980）針對傳統小拍面球拍與大拍面球拍的振動特性與反彈球速做比較，實驗過程是以六種球拍作為研究對象，即兩支大拍面網球拍和四支傳統小拍面球拍，並穿上張力為 55 磅之羊腸線；研究結果顯示，大拍面球拍對振動的反應比傳統小拍面的球拍小，且大拍面球拍之打擊有效區顯著大於傳統小拍面球拍，因此平均反彈球速也較快。

爾後 Elliott（1982）進一步研究發現，緊握球拍會增加球拍碰撞時之振動反應，且網球拍的振動反應會因球之撞擊點位置的不同而有所改變，當球撞擊在拍面的甜區（sweet spot）時，球拍的振動反應最小，而當球碰撞在甜區之外的位置時，便會使球拍的振動反應大幅增加，且球的反彈係數也減小了。此結論與張世聰和相子元（1998）研究網球正、反拍擊球振動對手臂之影響有相同的看法。從 Elliott 等人的研究可歸納出大拍面的網球拍，因拍面的打擊有效區比小拍面的球拍大，因而與球碰撞時，造成球拍之振動反應較小，然而過度緊握球拍的結果，只會增加球拍之振動程度，並因此造成手臂的負荷進而提早產生疲勞或傷害。

接著 Brody (1987) 分析網球拍之振動模式，在實驗中他採用固定鉗夾以及任其平衡站立的方式來固定球拍，以量測球拍受撞擊後之振動反應，結果用鉗夾固定的網球拍之振動頻率較低，皆分佈在 25~40Hz，所以有較大之振幅，而平衡站立的球拍之振動頻率高達 100~175Hz，各反應出不同之振動頻率，然而兩者皆有相類似之振動模式。而 Hatze (1993) 認為能量的損耗在網線方面相當少，大部分力學能損耗的因素是碰撞時拍框的反彈作用以及球拍內部的振動現象造成。

由 Hatze 的研究可發現其結論與 Elliott 等人先前的研究相呼應，亦即網球拍振動反應的程度，間接地減慢了球之反彈速度，換言之，球拍框內部的振動反應吸收了部分球給球拍之動量與人體揮拍動作所輸出的能量，因此振動較小的球拍僅流失少部分的力學能，所以會給予球較快的反彈球速。

近來，林寶城 (1997) 研究網球拍之振動特性，並從網球拍結構振動的觀點，探討網球拍本身之固有振動模態。研究結果指出，網球拍穿線以後，整體的固有頻率相對地降低；以網球拍的整體設計，如果僅針對擊球的反彈球速而言，球拍的勁度越大，越有利於擊球之反

彈球速，因此網球拍振動模態之固有頻率愈高，應該愈有利於擊球反應；另一方面，在球拍面底端加裝阻振器，可產生少許之阻振效果，故在每一條網線與拍框的交織處加裝阻振設備，可以阻隔一部分因碰撞所引起的振動力，使傳遞至拍柄的振動減少，進而降低手臂之負荷；然而這種避振器所能隔絕的振動頻率是屬於高頻區的範圍，因此其對人體的效果是有限的。

Chen、Lin 和 Huang（2000）藉由改變網球拍之組成材質，分析網球拍之振動特徵與振動對控球能力的影響；在研究結果中發現，碳纖維網球拍在振動程度的表現上，不論是球拍中心或偏心撞擊，皆比玻璃纖維製成之網球拍有較佳之阻振效果，且阻尼比隨著球拍碳纖維含量的減少，有逐漸減小的趨勢，而振動波所產生的能量則會因球拍碳纖維含量的減少，有逐漸增高的趨勢；其研究中並透過控球能力之測試，以評定振動程度對控球能力的影響，結果也指出優秀選手的控球能力亦會受振動程度所影響，因此推論球拍的振動增加了持拍手臂的負荷，以致影響擊球表現。

因此，有必要在網球拍設計或選擇使用的網球拍中，設法減少因球拍撞擊所引起之持拍部位振動行為，來改善擊球表現，以進一步提

昇運動成績。

第四節、結語

總合以上的文獻探討，網球拍結構體的設計與選擇，對擊球或碰撞的反應，與運動成績的提昇有很大的關係，這個結果可以從網球比賽型態的變化與打法、戰術的重大改變看出端倪。再者，大多數的研究僅針對網球拍的勁度、拍形、網線……等主題做研究，或是對各種研究主題以外之邊界條件皆不相同的球拍做比較，那麼更遑論網球拍材質與結構設計方面的研究了。

由先前的研究中，我們發現網球拍材質的種類，與上述文獻所探討的問題有很大的關係；因此進一步以改變球拍纖維排列的角度深入探討網球拍振動之問題，再藉由反彈球速比的變化，以找出網球拍、手腕和反彈球速比三者間的交互關係；由於材質種類與纖維排列角度不同，造成網球拍結構體的物性也就不一樣，故受到撞擊時，其反應出來的振動特徵也就會有差異，連帶地可能影響使用者之擊球表現。

所以，本研究改變網球拍之材質與纖維排列的角度，以作為研究的處理手段，深入地對網球拍材質結構做進一步研究，以瞭解網球拍振動特性，並藉此探討振動對持拍手腕和反彈球速比的影響，對於提昇網球之技術水準，實有其必要性。

第參章 研究方法與步驟

本研究透過網球拍材質的改變，並搭配結構體中不同強化纖維的排列角度，以找出其造成網球拍振動變化的情形。透過加速規與高速攝影機所收集到的資料，再將一些相關參數輸入振動力學方程中，以探討網球拍結構體之振動特徵。主要的方法與步驟將分為六個部份來說明：一、研究對象；二、實驗儀器與設備；三、實驗時間與地點；四、實驗步驟；五、對數衰減方程（Logarithmic Decrement Equation）之理論基礎；六、資料處理。

第一節、研究對象

本研究採用 Dunlop 牌 200G-Midsize 系列之中拍面網球拍的框形為主，將實驗用球拍各附以碳纖維與玻璃纖維比為 1：0、6：1、5：2 和 4：3 等四種不同的材質，並各自搭配二種不同的纖維排列角度，即與拍柄長軸夾角 22 度和 30 度等，球拍總共有八種搭配組合。且每

支球拍皆穿上 Dunlop 牌之專用網線，並控制其網線張力皆為 60lbs（27kgs），球拍總重 310g、平衡點在 330mm（距握柄端）、轉動慣量為 $0.0305 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，球拍勁度值控制在 55 ± 3 單位。並由一名男性選手，分別以右手持每一實驗拍的方式進行網球拍撞擊測試，實驗參加者的年齡、身高與體重分別為 30 歲、180 公分、69 公斤。實驗參加者於正式測試前，瞭解整個實驗的流程，研究者也會告知實驗參加者在整個實驗過程中可能發生的危險，以及研究者會採取的保護措施。在實驗參加者簽署「實驗參加者須知及參予同意書」後，方進行實驗的測試。

第二節 實驗儀器與設備

本研究所需的實驗儀器分為測量部分和資料處理部份。

（一）測量部分：

- 1、Biovision 加速規（Accelerometer）1 個（ $\pm 50\text{g}$ ）與 BioPAC 加速規（Accelerometer）1 個（ $\pm 500\text{g}$ ）。
- 2、Redlake IMAGING Motion SCOPE 8000 S 高速攝影機一部。
- 3、Biovision 人體表面力量傳感系統 1 具。

- 4、Biovision 多頻道多功能生物訊號處理系統，包括 586 筆記型電腦一台、A/D 訊號擷取卡一只、連線盒一只。
- 5、Lob-Ster 牌網球發球機一部與全新 Dunlop 牌網球一箱。
- 6、Babolat 牌網球拍測試機一台。
- 7、自製方形桌一台、背部垂直的測試椅一座和水平儀一個。

（二）資料處理部份：

- 1、Peak Motus 人體動作數位化分析系統。
- 2、DasyLab 3.5 版生物電訊號擷取系統。
- 3、Origin 6.0 版資料分析系統。
- 4、Microsoft Excel 2000 版資料分析系統。
- 5、SPSS for Windows 8.00 版統計分析軟體。

第三節、實驗時間與地點

本研究的實驗包含網球拍的製作與實驗球拍的撞擊測試，而撞擊實驗將先進行預備測試後，再進行正式測試，其時間與地點如下：

（一）網球拍的製作

- 1、實驗時間：2001 年十月。
- 2、實驗地點：源民安公司網球拍開發設計實驗室。

（二）實驗球拍的撞擊測試

壹、預備測試

- 1、實驗時間：2002 年二月。
- 2、實驗地點：國立臺灣體育學院體育研究所之運動生物力學實驗室。

貳、正式測試

- 1、實驗時間：2002 年二月。
- 2、實驗地點：國立臺灣體育學院體育研究所之運動生物力學實驗室。

第四節、實驗步驟

本研究在完成預備測試後，經檢討分析整個實驗流程的缺失（包括：加速規的擺置、力量傳感計、高速攝影機和測試球拍之擺設），始得進行正式測試。

實驗場地的佈置如下所述：將待測試的網球拍拍柄部位貼上力量傳感計，並由實驗參加者以大陸式握拍法緊握住球拍，且其中指與無名指須握在力量傳感計上，先施以實際打擊之動作，得知中指與無名指的正常握力值介於 3.5 伏特至 4.5 伏特之間，所以在撞擊過程中，設定力量傳感計顯示值須達 5 伏特以上（已超過正常擊球時之握力）。而後將整個前臂水平置放在方形桌上，身體則坐在椅背垂直的椅子上，並以水平儀調整球拍，使球拍面（face）與地面呈垂直，再將網球發球機置於球拍面的正前方 0.6m 處，使網球以約 28m/s 的球速，分別正面撞擊至球拍面的中心標明處（向心撞擊，center impact）及中心之外的標明處（上、下偏心撞擊，off-center impact）各 10 次；同時由高速攝影機拍攝每一次有效之撞擊。每一次撞擊後，均須檢視力量傳感計在撞擊過程中的握力值，以確認撞擊過程之握力是否有鬆動的現象（如圖 3-1 所示）。

加速規一個（ $\pm 500g$ ）先固定於距球拍握柄端 9 公分處，採集到該點之最大振幅值小於距握柄端 10 公分處（A 點）之最大振幅，因此得知距握柄端 10 公分處並非球拍擺動之節點，故將加速規（ $\pm 500g$ ）

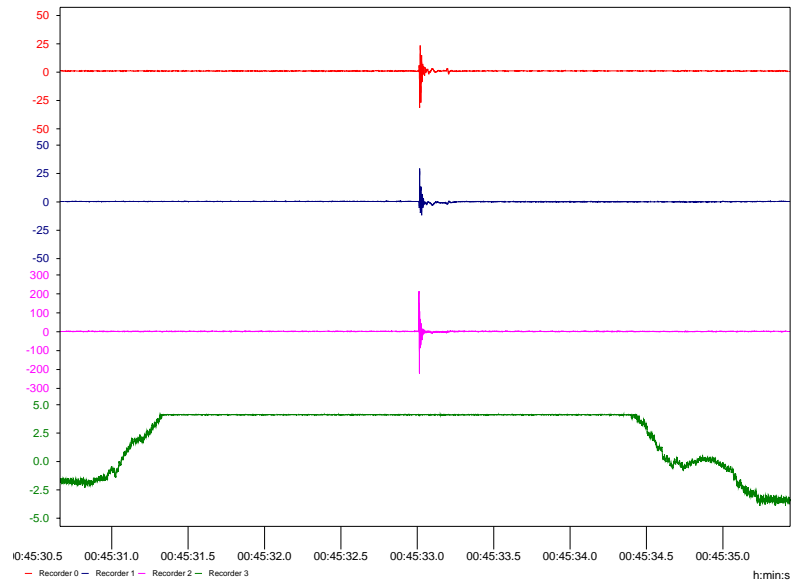


圖 3-1：球拍撞擊過程中，力量傳感計（下）與加速規之訊號示意圖。

固定於 A 點，另一個（ $\pm 50g$ ）則固定在持拍者的腕關節處（B 點，離手腕關節線 2 cm）。每支球拍均收集網球正確擊中網球拍之標明處的資料 10 次，BioPAC 的採樣頻率（Sample Rate）定為 10000Hz。同時高速攝影機架設的位置約為測試球拍右側 7.5 公尺處，以拍攝網球撞擊球拍面之過程，拍攝頻率定為每秒 1000 張。實驗儀器的架設，如圖 3-2 所示。

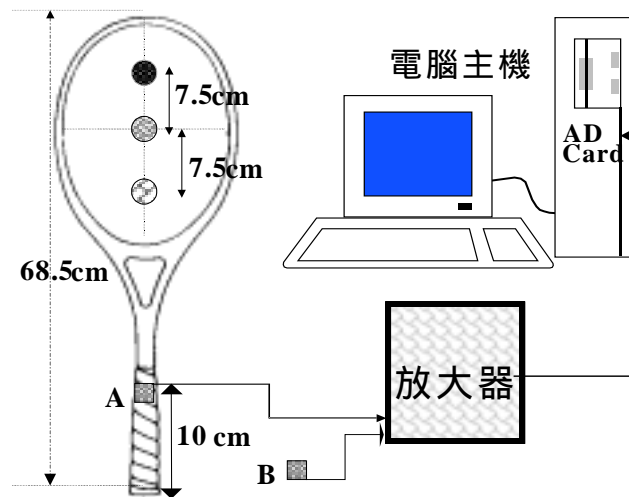


圖 3-2、實驗儀器架設連線圖。加速規的固定位置為 A 點（握柄）、B 點（腕關節），球拍面的圓圈為網球正面撞擊的位置。

第五節、對數衰減方程之理論基礎

機械振動是一種常見的物理現象，而振動指的是一物體相對於某一平衡位置附近所作的往返運動；在振動的過程中，若僅由回復力來保持其運動狀態，那麼這種振動方式就稱之為自由振動（free vibration）。系統在運動中多少總是承受了外界阻滯力量的作用，例如摩擦力、空氣阻力等，本研究所要探討網球拍之振動，即屬於有阻尼的自由振動，因此本節乃針對有阻尼的自由振動系統理論做概述，

並藉由此來評估各種材質搭配各纖維角度之網球拍的振動特徵。

圖 3-2 表示質量為 m 的質點，並連接於一彈簧及一個緩衝器內的活塞。假設緩衝器內的黏滯阻力 F_d 與質點速度 (\dot{x}) 的大小成正比，但方向相反，其方程式表為：

$$F_d = -c\dot{x} \quad (1)$$

而常數 c 稱之為系統的黏滯阻尼係數 (coefficient of viscous damping)。依圖 3-2 所示，由靜平衡位置算起，即可得到質點 m 在某一 x 位置處的運動方程式：

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2)$$

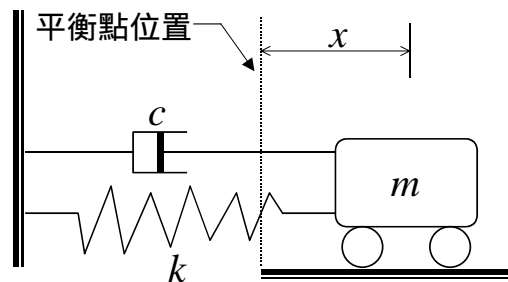


圖 3-3、質點處於有阻尼之振動系統簡圖。圖中彈簧的彈性係數 k 、
活塞內的黏滯阻尼係數 c 、質點的質量為 m 。

式(2)中，我們假設整個系統只包含了質點、彈簧和阻尼器 (亦即

緩衝器)，且其整個運動過程中並無其他外力的作用，故屬於一有阻尼的自由振盪系統。由於式(2)為一齊次 (homogeneous) 的二階常係數微分方程式。因此，令

$$x(t) = B e^{rt} \quad (3)$$

其中 B 、 r 為待定的常數。再將 (3) 帶入 (2) 中，可得

$$(mr^2 + cr + k)Be^{rt} = 0$$

由於 Be^{rt} 不為零函數，所以系統的特徵方程式為

$$mr^2 + cr + k = 0 \quad (4)$$

此方程式之兩根為

$$\begin{cases} r_1 = \frac{1}{2m}(-c + \sqrt{c^2 - 4mk}) \\ r_2 = \frac{1}{2m}(-c - \sqrt{c^2 - 4mk}) \end{cases} \quad (5)$$

在此先定義系統之臨界阻尼係數(critical damping coefficient)為 c_c ，且滿足

$$c_c^2 - 4mk = 0$$

所以

$$c_c = 2\sqrt{mk} = 2m\omega_n \quad (6)$$

而 $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 為無阻尼時，系統之自然頻率。

在有阻尼的振動系統裡，系統之阻尼比(damping ratio) ζ 為

$$\zeta = \frac{c}{c_c}$$

也可以說，阻尼比反應了系統之真正阻尼。有了自然頻率與阻尼比後，便可以將(5)式改寫成：

$$\begin{cases} r_1 = -(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n \\ r_2 = -(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n \end{cases} \quad (7)$$

從此兩個根之表達式可看出，若已知系統的 m 值與 k 值，那麼阻尼比的大小則決定了系統運動的行為。

根據阻尼比變化的不同，影響系統運動行為的情形可分為：

(一) 當阻尼比 ζ 大於 1 時

此時系統實際之阻尼係數 (c) 大於臨界阻尼係數 (c_c)，稱為過阻尼(over damping)系統。因此(5)式之 r_1 和 r_2 為兩相異實根，所以(2)式的解可以表成：

$$\begin{aligned} x(t) &= B_1 e^{r_1 t} + B_2 e^{r_2 t} \\ &= B_1 e^{-(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} + B_2 e^{-(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} \end{aligned} \quad (8)$$

所以在過阻尼的狀況下，其位置函數 $x(t)$ 會隨時間的增加而以指數的形式收斂至零，因此系統並無振動的現象（圖 3-3）。

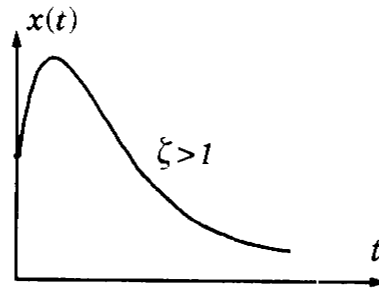


圖 3-4、過阻尼系統之位置函數圖。（李春穎，1996）

（二）當阻尼比 ζ 等於 1 時

此時系統之實際阻尼係數（ c ）等於臨界阻尼係數（ c_c ），稱之為臨界阻尼(critical damping)系統。此時(5)式之 r_1 和 r_2 為兩相等實根，所以 $r_1=r_2$ ，因此(2)式的解可表成：

$$x(t) = (B_3 + B_4 t)e^{-\omega_n t} \quad (9)$$

可以看出，此 $x(t)$ 是一個隨時間增加而遞減至零的函數，因此在臨界阻尼系統中並無振動的現象（圖 3-4）。

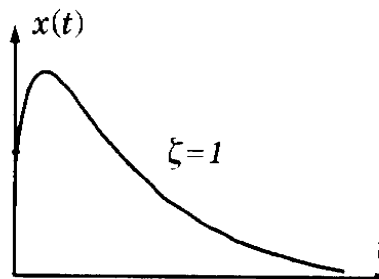


圖 3-5、臨界阻尼系統之位置函數圖。（李春穎，1996）

(三) 當阻尼比 ζ 小於 1 時

即系統實際阻尼係數 (c) 小於臨界阻尼係數 (c_c)，此時稱之為低阻尼(under damping)。此時(5)式之 r_1 和 r_2 為兩個共軛複數，即

$$\begin{aligned} r_1 &= -(\zeta - i\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n \\ r_2 &= -(\zeta + i\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n \end{aligned} \quad (10)$$

若定義阻尼振動頻率(frequency of damped vibration)

$$\omega_d = \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n$$

則(2)式之解可以表示成：

$$x(t) = e^{-\zeta\omega_n t} (B_5 e^{i\omega_d t} + B_6 e^{-i\omega_d t}) \quad (11)$$

由尤拉公式 (Euler's formula)：

$$e^{\pm i\omega_d t} = \cos \omega_d t \pm i \sin \omega_d t$$

因此可將式 (11) 改寫成：

$$x(t) = e^{-\zeta\omega_n t} (B_7 \cos \omega_d t + B_8 \sin \omega_d t) \quad (12)$$

$$= B_9 e^{-\zeta\omega_n t} \cos(\omega_d t - \phi_1) \quad (13)$$

$$= B_9 e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi_2) \quad (14)$$

(其中 B_7 和 B_8 為任意常數，由初始條件所決定。)

由解可看出，隨著時間增加，此函數的振幅逐漸縮小，即系統的振動現象將隨振幅的縮小而漸收斂至零（圖 3-5）。因此低阻尼是前述三種阻尼情況中，唯一有振動現象的系統，而網球拍之振動可視為低阻尼系統。

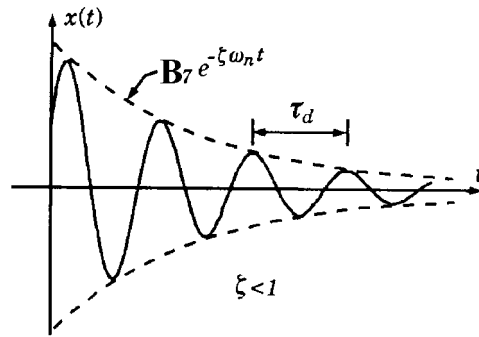


圖 3-6、低阻尼系統之位置函數圖。（李春穎，1996）

而由(12)式中，振幅 X 為

$$X = B_7 e^{-\zeta \omega_n t} \quad (13)$$

假設對應於振幅 X_m 的時刻為 t_m ，則由(13)式可得

$$X_m = B_7 e^{-\zeta \omega_n t_m} \quad (14)$$

相同地，對應於振幅 X_{m+k} 的時刻為 t_{m+k} ，即

$$X_{m+k} = B_7 e^{-\zeta \omega_n t_{m+k}} \quad (15)$$

接著將(14)式除以(15)式，可得

$$\frac{X_m}{X_{m+k}} = e^{-\zeta\omega_n(t_m - t_{m+k})} \quad (16)$$

因為 t_{m+k} 與 t_m 相差 k 個週期的時間，所以

$$t_{m+k} - t_m = k \cdot \frac{2\pi}{\omega_d} = k \cdot \frac{2\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n} \quad (17)$$

再將(17)式帶回(16)式中，並對等號兩邊取自然對數，即可得

$$\delta = \ln\left(\frac{X_m}{X_{m+k}}\right) = k \cdot \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (18)$$

因此，在低阻尼的自由振動系統，藉由 k 個週期的連續振幅比值，便可以求出系統之對數衰減率，以進一步瞭解系統運動的情形。所以本實驗透過加速規收集到各個搭配組合之網球拍和手腕的振動曲線，再利用曲線之第一、二振幅的峰值，便可求出該球拍或手腕的對數衰減率，進而瞭解其運動情形與物理特性及其對持拍手腕的影響。

第六節、資料處理

一、網球拍和手腕關節的振動測試

在網球拍和手腕關節振動特性的測試中，每一次撞擊的實驗資料，都需經過 DASYS Lab V6.00 版的軟體分析處理。其處理的過程在修勻 (filtering) 方面，我們先將原始資料 (raw data) 經殘差分析的處理後，得到最佳之截止頻率為 300Hz；因此，收集到的原始資料都需先經過低通濾波 (low pass filtering) 的修勻處理 (Winter & Patla, 1997)。修勻後的資料方用以記錄每次撞擊的振動波曲線之第一和第二振幅峰值，並計算球拍和手腕部位的對數衰減率值。

二、影片分析法

本研究的反彈球速比是以 Redlake 高速攝影機進行二度空間影片數位分析的拍攝，攝影機的拍攝頻率定為每秒 1000 張，攝影機到測試球拍的距離約為 7.5 公尺。影片的數位化處理是以 Peak 公司的 Motus 動作分析系統進行一個標誌點 (球點) 的數位化處理，原始數據經三次樣條 (Cubic Spline smoother) 修勻處理後，隨即進行運動學參數的計算。本研究中取得網球之入球速資料是以網球接觸球拍面前第 3 和 4 張的平均值，而出球速的資料則是以網球離開球拍面後第 4 和 5 張的平均值，再將出球速除以入球速，而得到該測試球拍的反彈球速比。

三、統計分析

本研究是以獨立樣本二因子變異數分析 (Two-way ANOVA) , 考驗不同網球拍的材質與各種纖維排列角度間, 對於拍柄位置和手腕位置之最大振幅、對數衰減率及反彈球速比的影響。當變異數分析結果達 $\alpha=.05$ 的顯著水準時, 即以最小顯著差異法 (LSD Method) 進行事後比較 (Kirk , 1995) 。統計的軟體以 SPSS 8.00 版計算之。

第肆章、結果與討論

本研究的主要目的在探討網球拍合成纖維的種類和疊層角度影響擊球反應之特徵；透過實驗所收集到的資料經數位化處理和低阻尼振動系統的對數衰減方程式（Logarithmic Decrement Equation）之計算，並分析網球撞擊前後之反彈球速比後，所得的結果與討論將分為四部份加以闡述：一、不同材質網球拍的振動特性分析；二、不同材質網球拍造成持拍手腕關節的振動反應；三、不同材質網球拍對反彈球速比的影響；四、綜合討論。

第一節、不同材質網球拍的振動特性分析

本研究所使用的八種網球拍是分別以二種纖維角度並搭配四種纖維比例所製成，藉由網球的正向撞擊測試後，拍柄和手腕位置的加速規所擷取到第一模態(First Mode)振動波的資料（如圖 4-1），經採

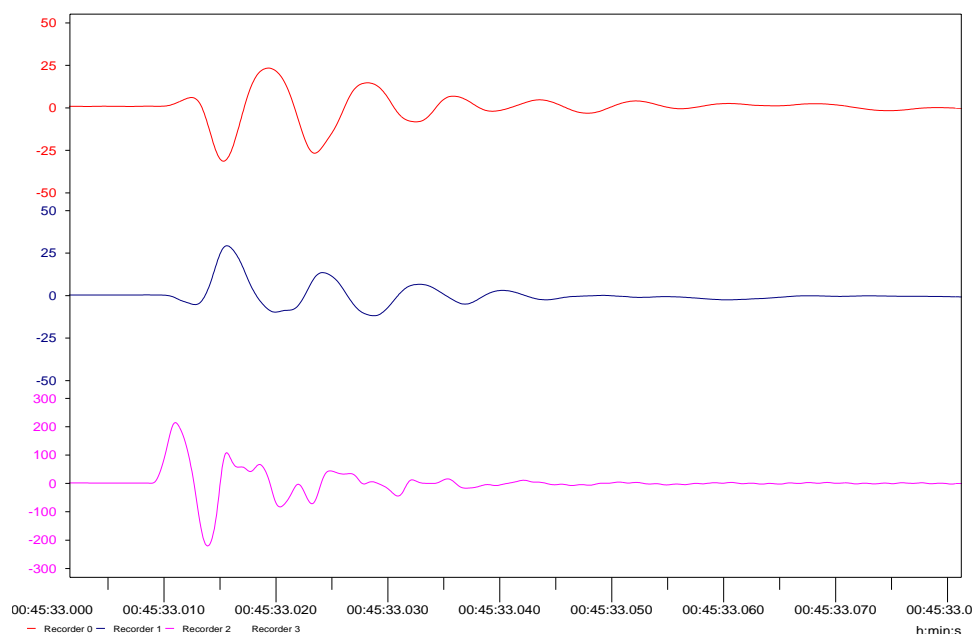


圖 4-1：實驗所採集到之振動波訊號。上、手腕-X 軸
；中、手腕-Y 軸；下、球拍柄。

集其振動波的第一(最大)與第二振幅峰值，並計算振動波的對數衰減率，亦即是從縱向（最大振幅）與橫向（對數衰減率）的觀點切入，來評比各個網球拍振動的差異，其結果分下列二點說明。

一、網球拍拍柄位置的最大振幅

表 4-1 為實驗測試的八種網球拍在球拍面中心、上端和下端之偏心撞擊時，由球拍柄位置（非節點）所測得振動波之最大振幅。此結果經獨立樣本二因子變異數分析後，得知球拍的纖維比例與纖維角度在中心 ($F_{(3,72)}=62.122$, $p<.05$, $\eta^2=.721$, $\text{Power}=1.000$)、上

端 ($F_{(3,72)}=13.375$, $p<.05$, $\eta^2=.358$, $\text{Power}=1.000$) 和下端 ($F_{(3,72)}=22.319$, $p<.05$, $\eta^2=.482$, $\text{Power}=1.000$) 之偏心撞擊時，對於振動波之最大振幅的交互作用皆達顯著差異水準，因此再以 LSD 法進行單純主要效果考驗，其結果如表 4-2、4-3 和 4-4。

根據 Kirk (1995)、Tomas、Salazar 和 Lander (1991) 與 Cohen (1969) 指出 η^2 比 0.2 小者為小處理效果、 η^2 在 0.5 左右者為中度處理效果、 η^2 比 0.8 大者屬於高處理效果。故由表 4-2、4-3 和 4-4 可以得知，纖維角度與纖維含碳比例對於最大振幅的交互影響，在不同的限定條件下有所不同，此二因素在中心和下端撞擊時屬於中度處理效果。在中心撞擊方面，纖維角度 30 度相較於 22 度時，有較大的振幅產生，直到纖維含碳比例超過 86% 以上，卻有相反的趨勢，這種現象在下端撞擊時也有類似的情況發生。但是在上端撞擊方面則屬偏低的處理效果，結果顯示纖維角度 30 度時的最大振幅皆比 22 度小，而且這種趨勢在各種纖維比例上皆相同。究其原因，可能是球拍的碳纖維含量達 86% 之臨界點後，大幅增加了球拍結構體的阻尼，因而纖維角度的變化對於最大振幅的影響效果，已經受制於結構體阻尼提升的效果；但是在上端撞擊位置因偏離球拍柄端（實驗參加者的握點）較遠，而且距離球拍結構強度最大的拍喉位置也較遠，所以纖維

比例改變所造成的影響效果不如纖維角度的作用效果，故在上端撞擊時，振幅變化呈現一致的趨勢。

從纖維比例的影響效果來看（圖 4-2），中心撞擊與下端撞擊有類似的趨勢，纖維含碳比例 57% 時的最大振幅皆較纖維含碳比例 100% 時大，且達顯著差異水準；再者，最大振幅隨纖維含碳比例的增加而減少；然而這個現象在上端撞擊時卻是相反的，亦即纖維含碳比例 100% 時的最大振幅較纖維含碳比例 57% 時大，最大振幅值隨纖維含碳比例的增加而有遞增的反應。

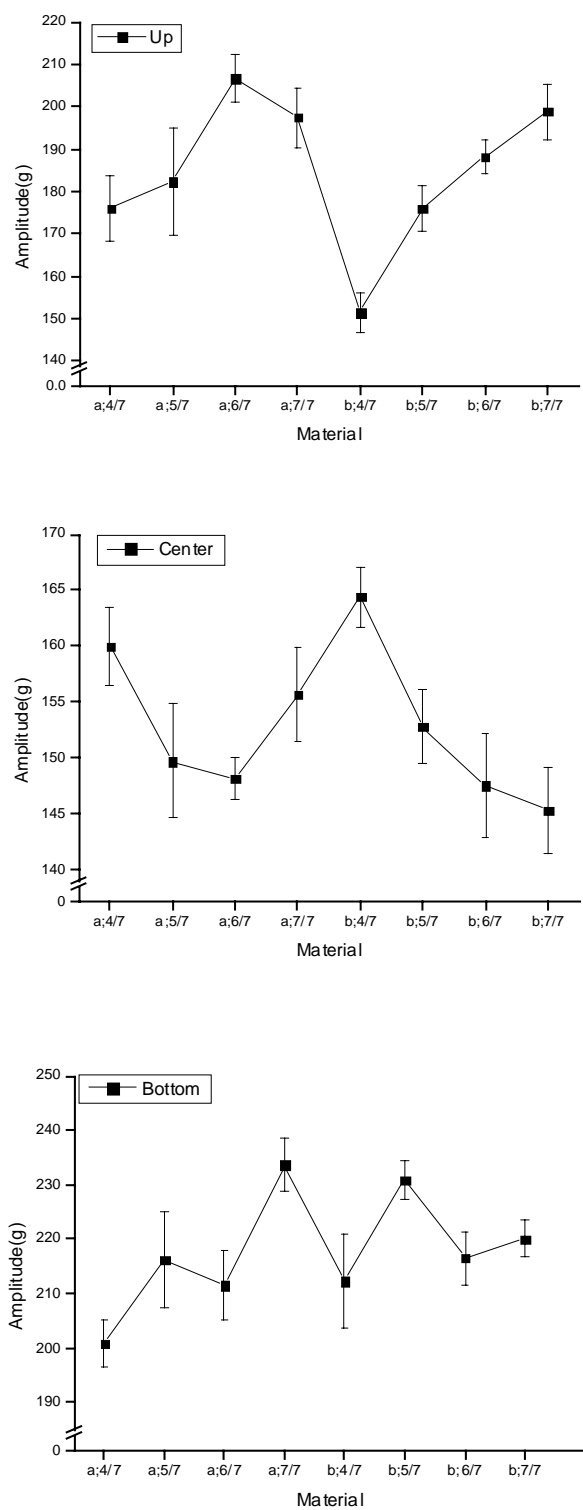


圖 4-2：八種網球拍在拍面上端、中心和下端之撞擊時，拍柄位置最大振幅之曲線圖。(a：纖維角度 22 度；b：纖維角度 30 度)

表 4-1、八種網球拍在拍面中心、上端和下端之撞擊時，拍柄位置的
最大振幅平均數和標準差

		纖維含碳比例							
		*100%		*86%		*71%		*57%	
		平均數	標準差	平均數	標準差	平均數	標準差	平均數	標準差
纖維角度									
22 度									
中心		155.72	4.23	159.99	3.51	149.67	5.11	148.18	1.90
*上端		197.54	7.06	206.66	5.72	182.41	12.55	176.05	7.62
*下端		233.55	4.95	211.56	6.34	216.23	8.75	200.89	4.33
纖維角度									
30 度									
中心		145.25	3.80	147.53	4.64	152.85	3.33	164.35	2.74
*上端		198.88	6.54	188.22	3.82	176.05	5.46	151.55	4.57
*下端		220.02	3.41	216.53	4.88	230.81	3.47	212.29	8.73
單位：g							*p<.05		

表 4-2、八種網球拍在拍面中心撞擊時，拍柄位置最大振幅之單純主要效果變異數分析摘要表

單純主要效果內容	<i>MS</i>	<i>F</i>	η^2	<i>Power</i> (1- β)
纖維角度				
*22 度 ^a	299.874	20.010	.625	1.000
*30 度 ^a	725.861	53.290	.816	1.000
纖維含碳比例				
*100% ^b	547.581	33.904	.653	1.000
*86% ^b	776.507	45.889	.718	1.000
71% ^b	50.435	2.714	.131	.345
*57% ^b	1307.183	235.278	.929	1.000
η^2 =處理效果 (effect size)				
^a <i>df</i> =3 ; ^b <i>df</i> =1				
* <i>p</i> <.05				

表 4-3、八種網球拍在拍面上端撞擊時，拍柄位置最大振幅之單純主要效果變異數分析摘要表

單純主要效果內容	<i>MS</i>	<i>F</i>	η^2	<i>Power</i> (1- β)
纖維角度				
*22 度 ^a	1949.588	26.157	.686	1.000
*30 度 ^a	4140.191	153.316	.927	1.000
纖維含碳比例				
100% ^b	8.898	.192	.011	.070
*86% ^b	1700.352	71.938	.800	1.000
71% ^b	202.439	2.162	.107	.286
*57% ^b	3002.230	75.986	.808	1.000
η^2 =處理效果 (effect size)				
^a <i>df</i> =3 ; ^b <i>df</i> =1				
* <i>p</i> <.05				

表 4-4、八種網球拍在拍面下端撞擊時，拍柄位置最大振幅之單純主要效果變異數分析摘要表

單純主要效果內容	<i>MS</i>	<i>F</i>	η^2	<i>Power</i> (1- β)
纖維角度				
*22 度 ^a	1851.815	46.285	.794	1.000
*30 度 ^a	627.850	20.321	.629	1.000
纖維含碳比例				
*100% ^b	916.523	50.819	.738	1.000
86% ^b	123.853	3.868	.177	.461
*71% ^b	1062.736	23.989	.571	.996
*57% ^b	649.914	13.695	.432	.938

η^2 =處理效果 (effect size)

^a*df*=3；^b*df*=1

* $p < .05$

二、網球拍拍柄位置的對數衰減率

表 4-5 為實驗測試的八種網球拍在球拍面中心、上端和下端之偏心撞擊時，由球拍柄位置（非節點）所測得振動波之對數衰減率。對數衰減率的計算是採集振動波之第一振幅峰值和第二振幅峰值，再透過低阻尼振動系統之對數衰減方程進行計算而得。此結果經獨立樣本二因子變異數分析後，得知球拍的纖維比例與纖維角度在中心 ($F_{(3,72)} = 3.890$, $p < .05$, $\eta^2 = .139$, $\text{Power} = .806$)、上端 ($F_{(3,72)} = 41.209$, $p < .05$, $\eta^2 = .632$, $\text{Power} = 1.000$) 和下端 ($F_{(3,72)} = 24.608$, $p < .05$, $\eta^2 = .506$, $\text{Power} = 1.000$) 之偏心撞擊時，對於振動波之對數衰減率的

影響皆有顯著的交互作用，因此再以 LSD 法進行單純主要效果考驗，其結果如表 4-6、4-7 和 4-8 所示。

由表 4-6、4-7 和 4-8 可以得知，纖維角度與纖維含碳比例對於振動波之對數衰減率的影響效果。在中心撞擊方面，纖維角度 22 度相較於 30 度，有較大的衰減率產生，但是這種現象在纖維比例 57% 和 100% 時，並未達顯著差異水準。就處理效果大小的層面來說，纖維角度對拍柄振動之對數衰減率的改變，並沒有如同纖維含碳比例的處理效果那麼高。

相反的，在上端撞擊和下端撞擊方面，纖維角度 22 度時的對數衰減率皆比 30 度小，而且這種趨勢在各種纖維比例皆相同，也都達顯著差異水準。探究其主要原因可能是中心撞擊點所處位置正好是位於球拍面的幾何中心上，此點的水平線正對著球拍框的三點與九點鐘位置，而此處之球拍框的曲率與上端和下端撞擊處所對應的位置之曲率有很大的不同所導致，因為曲率在球拍框位置上的差異造成該處纖維排列角度已不是實驗設計的 22 和 30 度。而上端和下端撞擊的結果，會因為這二個撞擊點所對應球拍框之曲率相同而有相類似的趨勢，此現象有別於中心撞擊的反應。

再者，從纖維比例的變化來看(圖 4-3)，中心撞擊和下端撞擊時，對數衰減率有隨纖維含碳量的減少而增加的趨勢，推論其原因可能是碳纖維剛性較高的緣故，對同一撞擊力的傳導效果比玻璃纖維強烈，因此反映出來的對數衰減率較玻璃纖維低；但這個特徵卻異於上端撞擊時的現象，這可能是上端撞擊位置已偏離球拍結構強度最大的球拍喉甚多的緣故，所以纖維比例的變化作用效果並不明顯，因而呈現如此的差異。

表 4-5、八種網球拍在拍面中心、上端和下端之撞擊時，拍柄位置的對數衰減率平均數和標準差

	纖維含碳比例							
	*100%		*86%		*71%		*57%	
	平均數	標準差	平均數	標準差	平均數	標準差	平均數	標準差
纖維角度								
22 度								
* 中心	0.647	0.051	0.803	0.032	0.782	0.075	0.781	0.036
上端	1.648	0.095	1.300	0.088	1.281	0.078	1.270	0.050
* 下端	0.504	0.058	0.346	0.038	0.586	0.095	0.757	0.073
纖維角度								
30 度								
* 中心	0.620	0.027	0.695	0.046	0.711	0.053	0.760	0.037
上端	1.637	0.191	1.517	0.083	1.415	0.108	0.821	0.072
* 下端	0.499	0.059	0.608	0.048	0.866	0.042	0.882	0.047

* p < .05

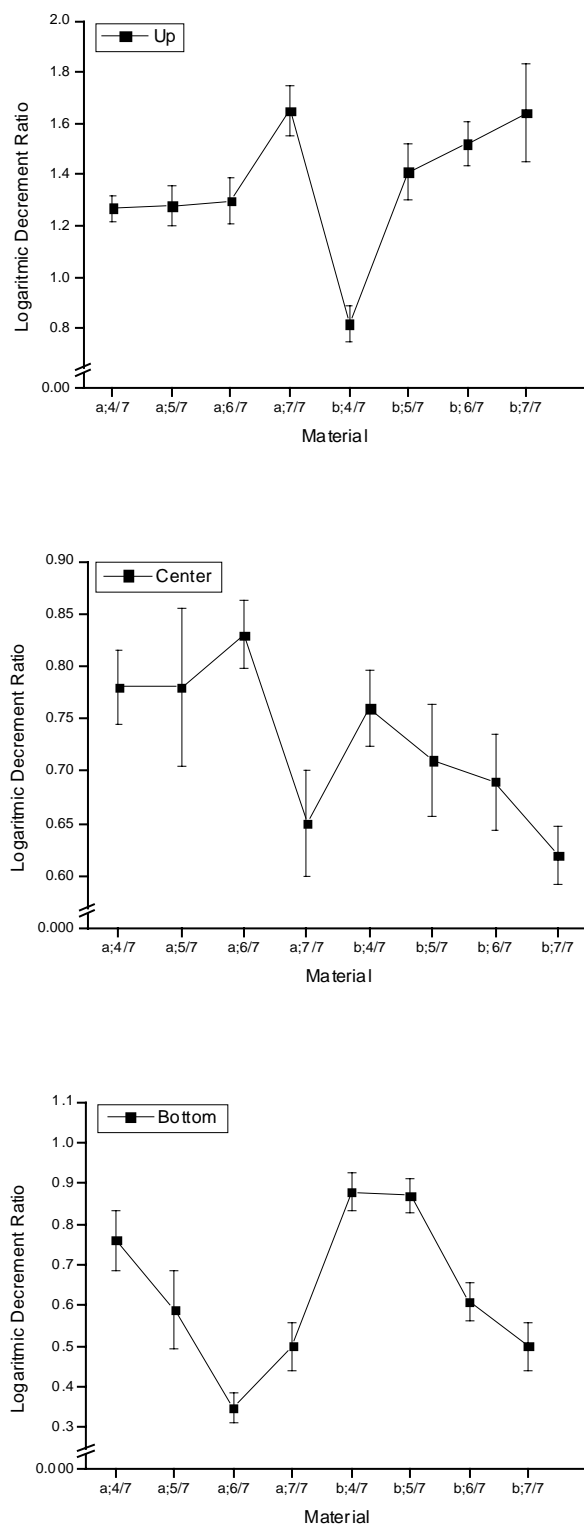


圖 4-3：八種網球拍在拍面上端、中心和下端之撞擊時，拍柄位置對數衰減率之曲線圖。(a：纖維角度 22 度；b：纖維角度 30

度)

表 4-6、八種網球拍在拍面中心撞擊時，拍柄位置對數衰減率之單純
主要效果變異數分析摘要表

單純主要效果內容	<i>MS</i>	<i>F</i>	η^2	<i>Power</i> (1- β)
纖維角度				
*22 度 ^a	.0511	19.452	.618	1.000
*30 度 ^a	.0340	19.733	.622	1.000
纖維含碳比例				
100% ^b	.0038	2.271	.112	.297
*86% ^b	.0589	38.018	.679	1.000
*71% ^b	.0253	6.058	.252	.644
57% ^b	.0021	1.554	.079	.219

 η^2 =處理效果 (effect size)^a*df*=3；^b*df*=1**p*<.05

表 4-7、八種網球拍在拍面上端撞擊時，拍柄位置對數衰減率之單純
主要效果變異數分析摘要表

單純主要效果內容	<i>MS</i>	<i>F</i>	η^2	<i>Power</i> (1- β)
纖維角度				
*22 度 ^a	.294	61.619	.837	1.000
*30 度 ^a	.362	149.200	.926	1.000
纖維含碳比例				
100% ^b	.0006	.026	.001	.053
*86% ^b	.236	32.421	.643	1.000
*71% ^b	.0893	10.115	.360	.852
*57% ^b	1.007	260.559	.935	1.000

 η^2 =處理效果 (effect size)^a*df*=3；^b*df*=1**p*<.05

表 4-8、八種網球拍在拍面下端撞擊時，拍柄位置對數衰減率之單純
主要效果變異數分析摘要表

單純主要效果內容	<i>MS</i>	<i>F</i>	η^2	<i>Power</i> (1- β)
纖維角度				
*22 度 ^a	1851.815	46.285	.794	1.000
*30 度 ^a	627.850	20.321	.629	1.000
纖維含碳比例				
*100% ^b	916.523	50.819	.738	1.000
86% ^b	123.853	3.868	.177	.461
*71% ^b	1062.736	23.989	.571	.996
*57% ^b	649.914	13.695	.432	.938

η^2 =處理效果 (effect size)

^a*df*=3；^b*df*=1

* $p < .05$

第二節、不同材質網球拍造成持拍手腕關節 的振動反應

本研究的目的之二，是要探討不同材質網球拍的振動對持拍手腕關節振動的影響。因此，本研究設計的測試方式是要求實驗參加者以正常握拍的方式（大陸式握拍法，亦即正拍截擊的方式），分別持用本實驗設計的八種材質網球拍來做正向之中心和偏心撞擊測試，並透過力量傳感計的訊號，同時監控撞擊瞬間的握力是否達到實驗設計的

要求水準。由手腕關節處的加速規所擷取到每一次有效撞擊的振動波資料，經採集其振動波的第一(最大)與第二振幅峰值，並計算該振動波的對數衰減率，以評比各個網球拍所造成手腕振動的差異；當網球拍之纖維角度與纖維比例對於手腕最大振幅與對數衰減率的交互作用達顯著差異水準時，再以 LSD 法進行單純主要效果考驗，其結果分下列二點說明。

一、手腕關節部位的最大振幅

表 4-9 為實驗設計的八種網球拍在球拍面中心、上端和下端之偏心撞擊時，由實驗參與者手腕部位所測得振動波之最大振幅。此結果經獨立樣本二因子變異數分析後，得知球拍的纖維比例與纖維角度在中心 ($F_{(3,72)}=13.965$, $p<.05$, $\eta^2=.355$, $\text{Power}=1.000$) 和下端 ($F_{(3,72)}=11.418$, $p<.05$, $\eta^2=.322$, $\text{Power}=.999$) 之撞擊時，對於振動波之最大振幅的交互作用皆達顯著差異水準，且皆屬中度處理效果，因此再以 LSD 法進行單純主要效果考驗，其結果如表 4-10 和 4-12。此外，在上端 ($F_{(3,72)}=1.629$, $p>.05$, $\eta^2=.064$, $\text{Power}=.411$) 撞擊變項中，交互作用的結果未達顯著差異水準，且屬於低處理效果，因此進行主要效果比較，其結果如表 4-11。

在單純主要效果的考驗方面，由表 4-10 和 4-12 可以得知，纖維角度與纖維含碳比例對於最大振幅的交互影響，在不同的限定條件下有所不同，在中心撞擊方面，纖維角度 22 度相較於 30 度時，有較大的振幅產生，而在纖維含碳比例為 71% 與 86% 時，纖維角度並未顯著影響最大振幅的變化；相同的趨勢也反映在下端撞擊上，然而只有在纖維比例 71% 時，才達到顯著差異水準。再從另一方向觀察，無論纖維角度的變化為何，纖維含碳比例在 100% 時，所造成手腕關節最大振幅值皆較其他纖維比例大，且達顯著差異水準。

在上端撞擊的主要效果比較方面，雖然纖維角度變化對最大振幅的影響屬低處理效果，但在纖維比例相同下，可看出纖維角度 22 度所造成手腕關節的最大振幅皆比 30 度大，如圖 4-4；另一方面，手腕關節之最大振幅也會隨著球拍含碳纖維比例的增加而增加，而纖維含碳比例 57%（玻璃纖維 43%）時，手腕關節有最小之振幅值，這個現象也反映出玻璃纖維因剛性較小，所以當球拍受到撞擊時，可緩衝部分的振動力所致，因而減少由撞擊引起的振動波能量，故手腕處反映出較小之振幅值，這個特徵解釋了玻璃纖維至今仍被廣泛混合應用的主要原因。

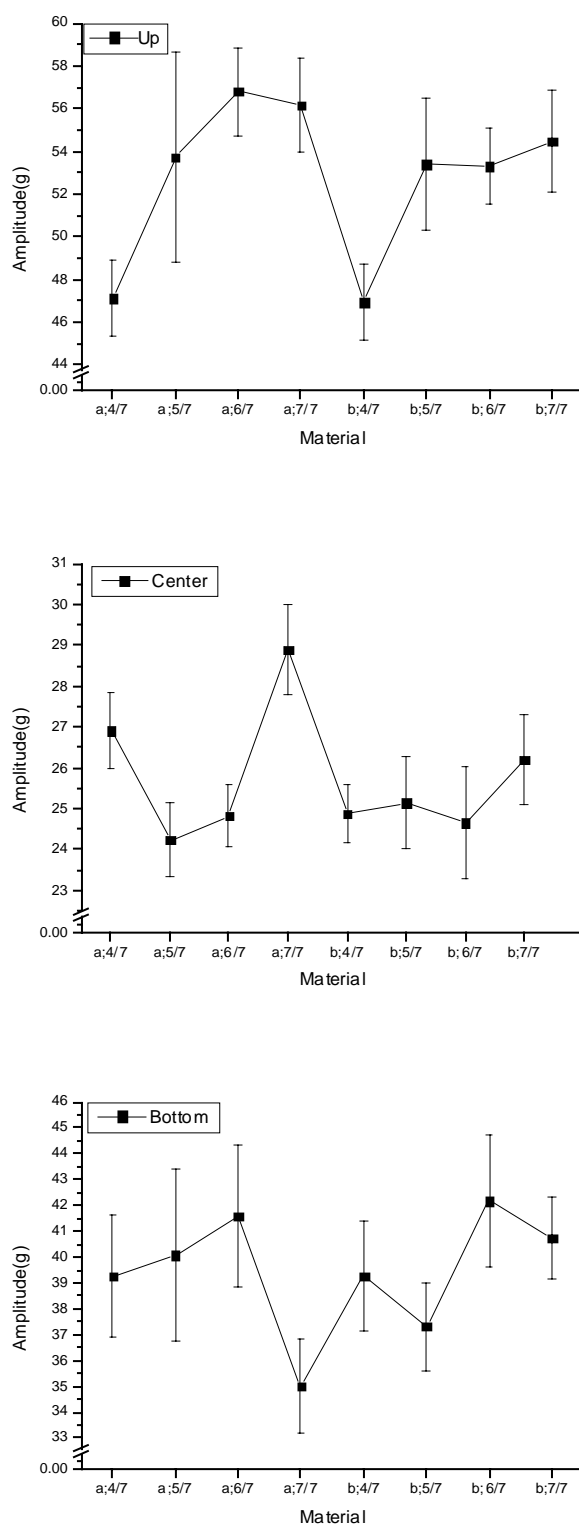


圖 4-4：八種網球拍在拍面上端、中心和下端之撞擊時，手腕位置最大振幅之曲線圖。(a：纖維角度 22 度；b：纖維角度 30

度)

表 4-9、八種網球拍在拍面中心、上端和下端之撞擊時，手腕關節部位的最大振幅平均數和標準差

		纖維含碳比例							
		*100%		*86%		*71%		*57%	
		平均數	標準差	平均數	標準差	平均數	標準差	平均數	標準差
纖維角度									
22 度									
* 中心		28.904	1.114	24.833	0.776	24.227	0.906	26.917	0.923
* 上端		56.159	2.176	56.804	2.072	53.733	4.941	47.133	1.800
* 下端		35.021	1.793	41.588	2.722	40.075	3.356	39.261	2.367
纖維角度									
30 度									
* 中心		26.189	1.111	24.663	1.384	25.149	1.138	24.889	0.702
* 上端		54.489	2.426	53.299	1.787	53.411	3.097	46.951	1.765
* 下端		40.744	1.557	42.178	2.555	37.306	1.696	39.271	2.156
單位：g							* p<.05		

表 4-10、八種網球拍在拍面中心撞擊時，手腕關節部位最大振幅之單純主要效果變異數分析摘要表

單純主要效果內容	<i>MS</i>	<i>F</i>	η^2	<i>Power</i> ($1-\beta$)
纖維角度				
*22 度 ^a	45.283	51.522	.811	1.000
*30 度 ^a	4.546	3.683	.235	.757
纖維含碳比例				
*100% ^b	36.850	29.788	.623	.999
86% ^b	.144	.114	.006	.062
71% ^b	4.245	4.014	.182	.475
*57% ^b	20.564	30.559	.629	.999

η^2 =處理效果 (effect size)

^a*df*=3；^b*df*=1

**p*<.05

表 4-11、八種網球拍在拍面上端撞擊時，手腕關節部位最大振幅之獨立樣本二因子變異數分析摘要表

變異來源	<i>MS</i>	<i>F</i>	η^2	<i>Power</i> ($1-\beta$)
組間				
*纖維角度 ^b	40.340	5.519	.071	.640
*纖維比例 ^a	301.198	41.211	.632	1.000
纖維角度*纖維比例 ^a	11.906	1.629	.064	.411

η^2 =處理效果 (effect size)

^a*df*=3；^b*df*=1

**p*<.05

表 4-12、八種網球拍在拍面下端撞擊時，手腕關節部位最大振幅之單純主要效果變異數分析摘要表

單純主要效果內容	<i>MS</i>	<i>F</i>	η^2	<i>Power</i> ($1-\beta$)
纖維角度				
*22 度 ^a	79.169	11.518	.490	.999
*30 度 ^a	43.426	10.570	.468	.997
纖維含碳比例				
*100% ^b	163.795	58.086	.763	1.000
86% ^b	1.745	.250	.014	.076
*71% ^b	38.336	5.422	.231	.596
57% ^b	.000	.000	.000	.050

η^2 =處理效果 (effect size)

^a*df*=3；^b*df*=1

**p*<.05

二、手腕關節部位之振動波對數衰減率

表 4-13 為實驗測試的八種網球拍在球拍面中心、上端和下端之偏心撞擊時，由手腕關節部位所測得振動波之對數衰減率。此結果經獨立樣本二因子變異數分析後，得知球拍的纖維比例與纖維角度在中心 ($F_{(3,72)}=16.770$, $p<.05$, $\eta^2=.411$, $\text{Power}=1.000$)、上端 ($F_{(3,72)}=33.091$, $p<.05$, $\eta^2=.580$, $\text{Power}=1.000$) 和下端 ($F_{(3,72)}=14.778$, $p<.05$, $\eta^2=.381$, $\text{Power}=1.000$) 之偏心撞擊時，對於手腕關節部位之振動波對數衰減率的交互作用皆達顯著差異水準，因此再以 LSD

法進行單純主要效果考驗，其結果如表 4-14、4-15 和 4-16。

由表 4-14、4-15 和 4-16 可以得知，纖維角度與纖維含碳比例對於振動波之對數衰減率的交互影響，在不同的限定條件下有所不同。在中心撞擊方面，當纖維角度為 22 度時，纖維含碳比例 57% 表現出最大的對數衰減率 (2.161)，而纖維含碳比例 100% 次之 (2.14)，但此二者間並未達顯著差異，同組中，纖維含碳比例 86% 之對數衰減率 (1.68) 最小；然而當纖維角度 30 度時，纖維含碳比例 100% 顯現出最大的對數衰減率 (2.04)，而纖維含碳比例 86% 之對數衰減率 (1.21) 最小。再以纖維角度作比較，纖維角度 22 度相較於 30 度時，皆有較大的對數衰減率產生，這種現象在任何纖維比例上皆有相同的結果，且達顯著的差異水準。

在下端撞擊方面，亦與中心撞擊有類似的趨勢產生。唯有在上端撞擊時顯現出不一樣的趨勢，此時當纖維角度 22 度時，纖維含碳比例 100% 表現出最大的對數衰減率 (1.71)，而纖維含碳比例 71% 次之 (1.58)，但此二者間並未達顯著差異，反而是纖維含碳比例 57% 最小 (1.25)；反之，當纖維角度 30 度時，纖維含碳比例 86% 有最大的對數衰減率 (1.40)，而纖維含碳比例 100% 有最小的對數衰減率 (1.15)。由此可看出，纖維比例在此部位（上端，對應球拍框之二

點鐘位置)的影響效果不如纖維角度的作用效果，故纖維角度對手腕振動衰減率的影響有顯著之效果。再者，從纖維比例上的變化來看，纖維角度 22 度皆比纖維角度 30 度有較大之對數衰減率，此結果則與中心撞擊和下端撞擊之結果有相同趨勢。

表 4-13、八種網球拍在拍面中心、上端和下端之撞擊時，手腕關節部位的對數衰減率平均數和標準差

纖維含碳比例								
*100%			*86%		*71%		*57%	
	平均數	標準差	平均數	標準差	平均數	標準差	平均數	標準差
纖維角度								
22 度								
* 中心	2.138	0.133	1.681	0.116	1.864	0.372	2.161	0.164
* 上端	1.710	0.095	1.414	0.096	1.578	0.243	1.247	0.104
下端	0.416	0.067	0.646	0.069	0.573	0.152	0.771	0.063
纖維角度								
30 度								
* 中心	2.036	0.141	1.207	0.160	1.705	0.216	1.294	0.076
* 上端	1.146	0.069	1.399	0.096	1.158	0.067	1.347	0.124
下端	0.726	0.141	0.613	0.065	0.557	0.076	0.692	0.140

* p < .05

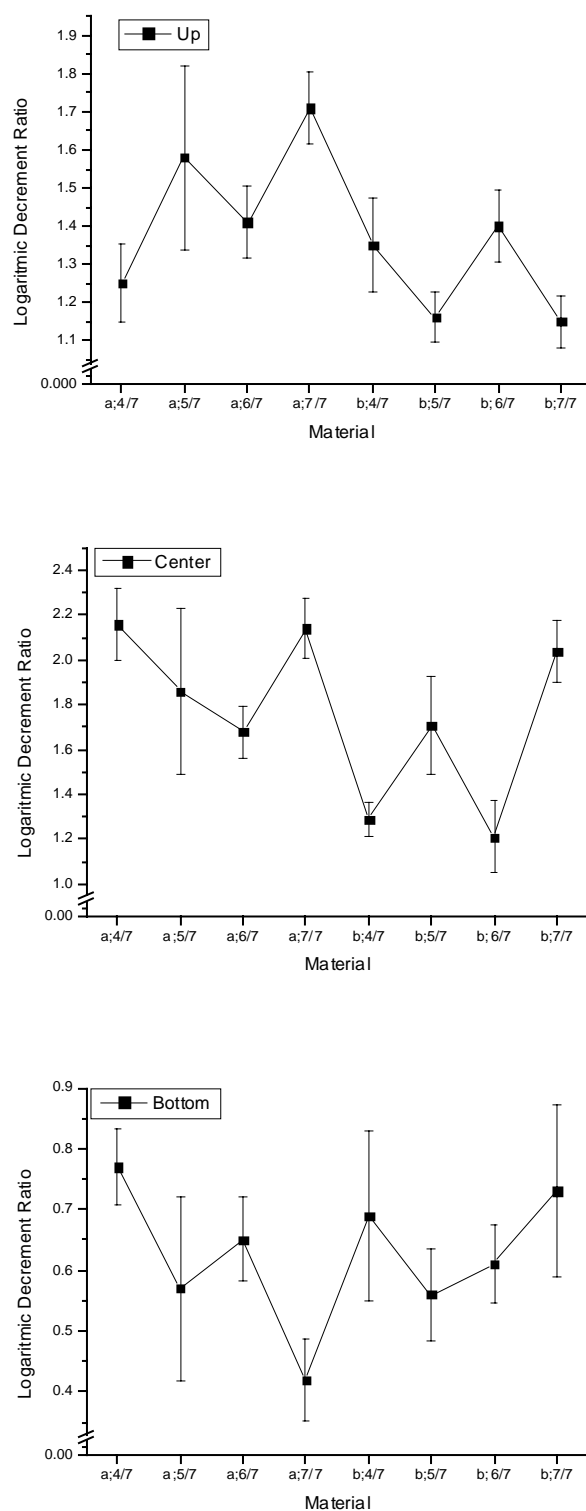


圖 4-5：八種網球拍在拍面上端、中心和下端之撞擊時，手腕位置對數衰減率之曲線圖。(a：纖維角度 22 度；b：纖維角度 30 度)

表 4-14、八種網球拍在拍面中心撞擊時，手腕關節部位對數衰減率之
單純主要效果變異數分析摘要表

單純主要效果內容	<i>MS</i>	<i>F</i>	η^2	<i>Power</i> (1- β)
纖維角度				
*22 度 ^a	.530	10.788	.473	.998
*30 度 ^a	1.476	60.256	.834	1.000
纖維含碳比例				
100% ^b	.052	.743	.132	.348
*86% ^b	1.122	57.418	.761	1.000
71% ^b	.125	1.351	.070	.196
*57% ^b	3.754	229.192	.927	1.000
η^2 =處理效果 (effect size)				
^a <i>df</i> =3 ; ^b <i>df</i> =1				
* <i>p</i> <.05				

表 4-15、八種網球拍在拍面上端撞擊時，手腕關節部位對數衰減率之
單純主要效果變異數分析摘要表

單純主要效果內容	<i>MS</i>	<i>F</i>	η^2	<i>Power</i> (1- β)
纖維角度				
*22 度 ^a	.403	18.259	.603	1.000
*30 度 ^a	.168	19.875	.624	1.000
纖維含碳比例				
*100% ^b	1.590	229.251	.927	1.000
86% ^b	.001	.132	.007	.064
*71% ^b	.885	27.837	.607	.999
57% ^b	.050	3.840	.176	.458
η^2 =處理效果 (effect size)				
^a <i>df</i> =3 ; ^b <i>df</i> =1				
* <i>p</i> <.05				

表 4-16、八種網球拍在拍面下端撞擊時，手腕關節部位對數衰減率之

單純主要效果變異數分析摘要表

單純主要效果內容	<i>MS</i>	<i>F</i>	η^2	<i>Power</i> ($1-\beta$)
纖維角度				
*22 度 ^a	.219	24.128	.668	1.000
*30 度 ^a	.058	4.716	.282	.862
纖維含碳比例				
*100% ^b	.479	39.295	.686	1.000
86% ^b	.006	1.224	.064	.182
71% ^b	.001	.091	.005	.059
57% ^b	.031	2.633	.128	.336

η^2 =處理效果 (effect size)

^a*df*=3；^b*df*=1

**p*<.05

第三節、不同材質網球拍對反彈球速比的影響

本研究使用的八種網球拍乃分別以二種纖維角度，各搭配四種由碳纖維與玻璃纖維混合之纖維比例所製成；透過高速攝影機拍攝網球正向撞擊球拍面上、中、下三個標誌點的過程，影片拍攝頻率定為1000Hz，經採集球撞擊球拍面前第3和第4張影片之平均入球速和球離開拍面第4和第5張影片之平均出球速，再將出球速除以入球速，以計算每次撞擊之反彈球速比（球之恢復係數），藉此探討此八種網球拍擊球後反彈球速比的差異；其結果如表4-17所示，分中心、下端和上端撞擊等三部分做說明。

一、中心撞擊之反彈球速比

表 4-17 為八種網球拍在球拍面中心、上端和下端之偏心撞擊時，所測得反彈球速比之平均數和標準差。此結果經獨立樣本二因子變異數分析後，得知球拍的纖維比例與纖維角度在中心撞擊($F_{(3,72)}=.273$ ， $p>.05$ ， $\eta^2=.011$ ， $\text{Power}=.100$) 時，對於反彈球速比的交互作用並未達顯著差異水準；因此，進行各因子的主要效果比較，表 4-18 所示為八種網球拍在拍面中心撞擊時，反彈球速比之獨立樣本二因子變異數分析摘要表。

中心撞擊的主要效果比較方面，當纖維比例為相同之處理水準時，纖維角度 22 度所造成之反彈球速比皆較角度 30 度時大(圖 4-6)；另一方面，反彈球速比也會隨著球拍含碳纖維比例的增加而增加，因此纖維含碳比例 100% 時，反彈球速比皆呈現最大值(0.334, 0.316)。這個現象也反映出碳纖維因剛性較高，因而在撞擊過程中，球拍結構體之形變量較小，所以損耗較少之總力學能，故能回予反彈球較多之力學能，因此有較大之反彈球速比，亦即反彈球速較快。

表 4-17、八種網球拍在拍面中心、上端和下端之撞擊時，反彈球速比

之平均數和標準差

纖維含碳比例								
	100%		86%		71%		57%	
	平均數	標準差	平均數	標準差	平均數	標準差	平均數	標準差
纖維角度								
22 度								
* 中心	0.334	0.016	0.312	0.013	0.322	0.022	0.322	0.018
* 上端	0.155	0.022	0.131	0.027	0.109	0.015	0.114	0.019
* 下端	0.367	0.022	0.357	0.016	0.359	0.040	0.324	0.012
纖維角度								
30 度								
* 中心	0.316	0.012	0.295	0.020	0.310	0.029	0.313	0.018
* 上端	0.156	0.013	0.146	0.012	0.118	0.012	0.128	0.029
* 下端	0.405	0.017	0.366	0.018	0.346	0.024	0.337	0.023
*p<.05								

表 4-18、八種網球拍在拍面中心撞擊時，反彈球速比之獨立樣本二因子變異數分析摘要表

變異來源	<i>MS</i>	<i>F</i>	η^2	<i>Power</i> (1- β)
組間				
*纖維角度 ^b	.00384	.608	.128	.895
*纖維比例 ^a	.00159	4.378	.154	.854
纖維角度*纖維比例 ^a	9.8E-05	.273	.011	.100

η^2 =處理效果 (effect size)

^adf=3；^bdf=1

*p<.05

二、上端撞擊之反彈球速比

上端撞擊之反彈球速比（表 4-17）的結果經獨立樣本二因子變異數分析後，得知球拍的纖維比例與纖維角度在上端撞擊（ $F_{(3,72)}=.543$ ， $p>.05$ ， $\eta^2=.022$ ，Power=.156）時，對於反彈球速比的交互作用並未達顯著差異水準；因此，進行各因子的主要效果比較。表 4-19 所示為八種網球拍在拍面上端撞擊時，反彈球速比之獨立樣本二因子變異數分析摘要表。

由上端撞擊的主要效果比較看來，當纖維比例在相同之處理水準時，纖維角度 22 度所產生之反彈球速比皆較角度 30 度時小，此情形正好與中心撞擊時相反，但是從 η^2 值（.064）可以看出，纖維角度的變化對於反彈球速比的作用屬於低處理效果；再從纖維比例的變化來看，纖維比例對於反彈球速比的作用屬於中處理效果。因此反彈球速比會有隨著球拍含碳纖維比例增加而增加的趨勢（圖 4-6），故纖維含碳比例 100% 時，反彈球速比皆呈現最大值（20 度：0.155；30 度：0.156）。纖維比例的變化所反映出來的趨勢與中心撞擊時相同，也反映出碳纖維因剛性較高的緣故，因而在撞擊過程中，球拍結構體內部有較少之形變量產生，所以損耗較少之總力學能，因此有較大之反彈球速比，亦即有較快之反彈球速。

表 4-19、八種網球拍在拍面上端撞擊時，反彈球速比之獨立樣本二因子變異數分析摘要表

變異來源	<i>MS</i>	<i>F</i>	η^2	<i>Power</i> ($1-\beta$)
組間				
*纖維角度 ^b	0.00192	4.905	.064	.589
*纖維比例 ^a	0.00697	17.839	.426	1.000
纖維角度*纖維比例 ^a	2.12E-04	0.543	.022	.156

η^2 =處理效果 (effect size)

^a*df*=3；^b*df*=1

**p*<.05

三、下端撞擊之反彈球速比

下端撞擊之反彈球速比(表 4-17)的結果經獨立樣本二因子變異數分析後，得知球拍的纖維比例與纖維角度在下端($F_{(3,72)}=4.267$ ， $p<.05$ ， $\eta^2=.151$ ， $\text{Power}=.844$)撞擊時，對於反彈球速比的交互作用達顯著差異水準，因此再以 LSD 法進行單純主要效果考驗，其結果如表 4-20。

在單純主要效果的考驗方面，由表 4-20 可知，纖維角度與纖維含碳比例對於反彈球速比的交互影響，在不同的限定條件下有所不同。在每一種纖維比例下，纖維角度 22 度相較於 30 度時，皆有較小的反彈球速比，但只有纖維含碳比例為 100%時，才達顯著差異水準，此情形也與中心撞擊時相反，但和上端撞擊時相同。

另一方面，在相同的角度下（圖 4-6），纖維含碳比例為 100% 時，有最大的反彈球速比（0.367；0.405）。這個現象與中心和上端撞擊時相同，也是反映出碳纖維因剛性較高的特性，因而在撞擊過程中損耗較少之力學能，所以有較大之反彈球速比。

表 4-20、八種網球拍在拍面下端撞擊時，反彈球速比之單純主要效果變異數分析摘要表

單純主要效果內容	<i>MS</i>	<i>F</i>	η^2	<i>Power</i> (1- β)
纖維角度				
*22 度 ^a	.004	5.725	.323	.924
*30 度 ^a	.009	21.436	.641	1.000
纖維含碳比例				
*100% ^b	7.35E-03	19.289	.517	.986
86% ^b	3.84E-04	1.350	.070	.196
71% ^b	8.96E-04	0.816	.043	.137
57% ^b	8.37E-04	2.436	.119	.315

η^2 =處理效果 (effect size)

^a*df*=3；^b*df*=1

**p*<.05

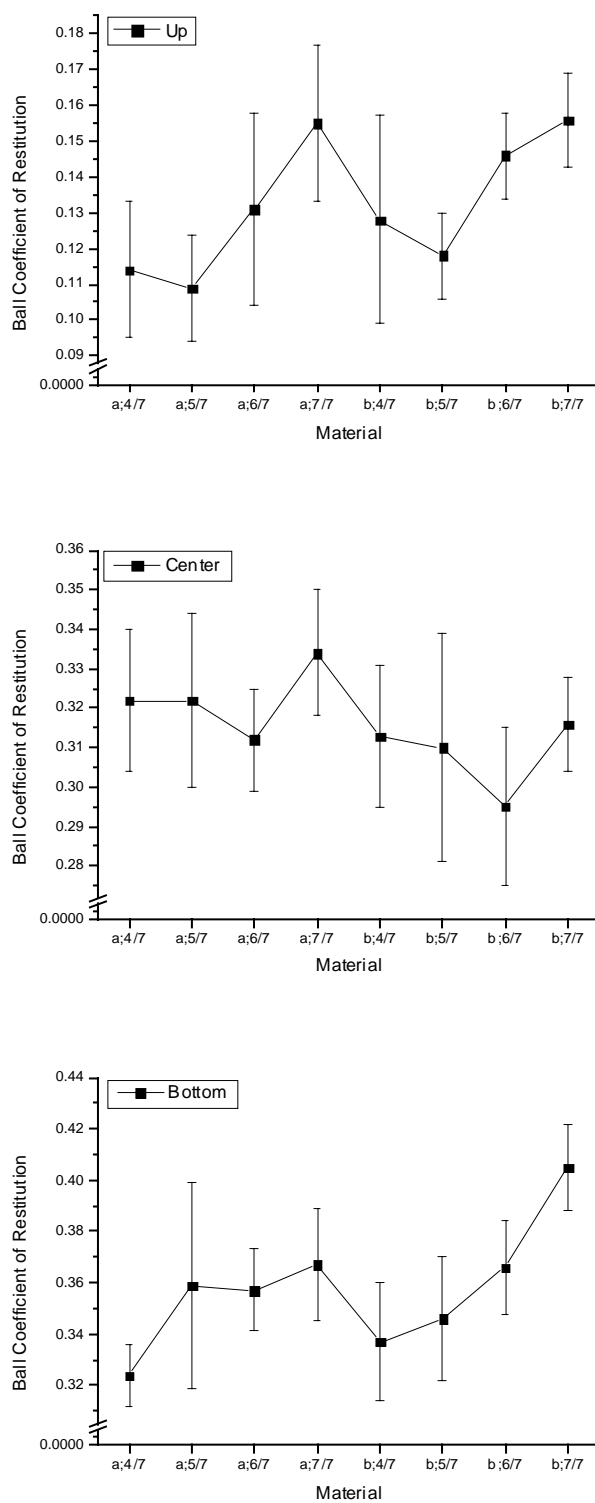


圖 4-6：八種網球拍在拍面上端、中心和下端之撞擊時，反彈球速比之曲線圖。(a：纖維角度 22 度；b：纖維角度 30 度)

第四節、綜合討論

統合實驗的結果可以發現，網球拍在中心撞擊和下端撞擊時，每一個研究觀察的變項皆有類似的反應趨勢，但是在上端撞擊時則未必有如此相同的情形，在此依每個觀察變項作歸納整理。

一、球拍柄和手腕振動波之最大振幅比較

首先以纖維角度的變化來看，本研究採用網球拍製作過程中較常用的 22 度和 30 度之纖維排列角度，由結果顯示：纖維角度 22 度時，所引起之最大振幅多比纖維角度 30 度時大，且無論在球拍柄或手腕部位皆有相同的反應產生。如此的結果解釋了纖維角度的變化影響球拍框斷面之抗剪力的大小，而球拍結構體之纖維角度 22 度時，構成結構體線孔附近之抗剪力較小，所以在撞擊過程中球拍框有較大之形變量，因而有較大之振幅反應。

由於纖維角度是指纖維方向與球拍長軸的夾角，但是撞擊力是藉由球拍線傳輸至球拍框上；因此，若以中心撞擊點來說，其水平線對應到球拍框的三點鐘位置，這個位置即是撞擊力量在球拍框的作用點，所以當撞擊力為定值時，纖維角度 22 度所構成拍框斷面的抗剪

力較 30 度小，因而纖維角度 22 度所產生之有效彎矩量必大於纖維角度 30 度的形變量；這種效應有如一支垂直置放的尺，當尺受到軸向拉力時，其形變量少（強度高），若受到側向拉力時則形變量大（抗剪力小）。故纖維角度 22 度所產生之最大振幅大於纖維角度 30 度時的振幅值便得到印證。

其次觀察纖維比例影響之特徵：球拍柄測得之最大振幅在中心撞擊和下端撞擊時有相同的趨勢，即碳纖維比例越多，最大振幅值越小；這個趨勢正好與手腕部位測得的結果完全相反，手腕部位反應出球拍中含碳纖維比例越多，最大振幅值越大。這個現象說明了一個結果，即球拍振動的振幅越大，將因此消耗了撞擊過程之總力學能，以致於傳遞到手腕的力學能減少了，所以測得振動波在手腕和球拍柄的結果是呈現相反的趨勢。此結果亦驗證了 Hatze（1993）所闡述之能量守衡數學模式中的說法，即球拍和球接觸的過程中，球拍結構體的變形是損耗總力學能的主要原因。再從另一角度來看，這個現象反映了現今網球拍製作材質的選用，並非全由 100% 的碳纖維所製成，仍會選用玻璃纖維或纖維剛性較碳纖維低的人工合成纖維，如 kevlar 纖維等，來混合搭配碳纖維的球拍，而這個目的即是要藉由玻璃纖維等剛性較低和纖維韌性較高的特性，對撞擊力的作用過程能給予部份

緩衝的空間，因為一場比賽中，球拍的撞擊次數上千次以上，如此大的撞擊力對人體來說是相當大的負擔，因而必須從球拍上著手改良，以減緩撞擊力所帶來的負面衝擊。

二、球拍柄和手腕振動波之對數衰減率比較

振動波的對數衰減率是從橫向的角度來評比振動的特徵，以比較振動波的趨緩程度，其結果顯示：纖維角度 22 度時，球拍柄位置的對數衰減率比纖維角度 30 度小，此結果說明由纖維角度 22 度所製成的網球拍結構體有較小之阻尼，因此振動波的趨緩程度較慢，所以會有較大之振動反應。另一方面，由手腕部位所取得之對數衰減率卻是纖維角度 22 度較大，其結果與拍柄位置相反，由於人體並不屬於剛體結構，所以對球拍傳遞來的振動力會有吸收的作用，經比對纖維角度 22 度之最大振幅皆較 30 度大，而二種角度之第二振幅並無顯著差異，因此這個現象說明手腕在纖維角度 22 度的球拍上吸收較多之振動波能量。其次觀察纖維比例造成的影響：球拍柄位置測得之對數衰減率在中心撞擊和下端撞擊時有相同的趨勢，結果顯示碳纖維比例越多，對數衰減率越小，推論其原因乃由於碳纖維的剛性較高，所以對撞擊而產生振動力的傳導效果較為強烈；反之，玻璃纖維因剛性較小，所以在撞擊過程中，結構體之形變量較大，故損耗較多之力學能，

換言之，對撞擊力有較好的緩衝效果。球拍柄位置之對數衰減率趨勢正好與手腕部位相反，球拍中碳纖維比例越多，則手腕部位之對數衰減率值越大。此現象與最大振幅的結果相互比對，說明了一個結果，亦即手腕關節確實吸收了多數的振動能量所導致，這可以由對數衰減率的公式乃由第一振幅除以第二振幅的值再取對數值，所以對數衰減率值越大，表示第一振幅較大或第二振幅較小的緣故，亦即手腕關節吸收了部分的振動能量而造成如此的結果。

三、各種實驗拍之反彈球速比方面

從纖維角度的變化來看，結果顯示：纖維角度 30 度時，擊球後之反彈球速比都比纖維角度 22 度時大。這個結果對照拍柄位置之最大振幅，兩者間可以相互呼應，即球拍結構體在撞擊過程中引起的振幅越大，則損耗越多的力學能，因此球在撞擊後所獲得的力學能也大幅地減少，故反彈球速比較小，亦即反彈球速較慢。此現象呼應了先前 Brody (1979) 研究球拍勁度與反彈球速的結果，在他的研究中也指出球與球拍碰撞之際，球拍結構體之變形越大，則損耗越多之力學能。

其次觀察纖維比例對反彈球速比的影響。反彈球速比無論在中心

撞擊和上端、下端之偏心撞擊時都有相同的趨勢，即碳纖維比例越多，反彈球速比越大；這個趨勢也與球拍柄部位測得最大振幅的結果相反，這個現象更加印證了上述力學能轉變過程的說法。

由以上的分析探討，確認了網球拍纖維角度和纖維比例對擊球反應的影響，也從觀察變項間的結果瞭解其間相互影響的機轉。所以在一場漫長的網球比賽中運動員每一次的揮拍，皆須面對強大撞擊力的衝擊，因此對持拍手臂的負荷可想而知；透過網球拍材質結構特性的認知，以瞭解球拍之阻振能力，再配合運動員擊球之特殊性來選用適合個人打法的球拍，以減少手臂的負荷，對增加運動表現與降低運動傷害可能造成的因素，確實成為現今運動科學的工作重點。

第伍章、結論與建議

壹、結論

本研究透過網球拍之四種合成纖維的種類和二種纖維疊層角度，以探討其影響擊球反應之特徵；經資料的分析處理，得到以下的結論：

一、球拍柄和手腕振動波之最大振幅方面

纖維角度 22 度時之最大振幅比纖維角度 30 度時大，且無論在球拍柄或手腕部位皆有相同的趨勢。而球拍結構體中纖維含碳比例越多，拍柄位置之最大振幅值越小；手腕部位測得的反應則有相反的結果，即球拍結構體中纖維含碳比例越多，手腕之最大振幅值越大。

二、球拍柄和手腕振動波之對數衰減率方面

球拍柄位置之對數衰減率在纖維角度 30 度時較大，但手腕部位之對數衰減率則是纖維角度 22 度較大。在纖維比例的影響上，由於

碳纖維的剛性較高，對撞擊力的傳導較為強烈，所以纖維含碳比例越多，拍柄位置之對數衰減率越小。而手腕部位則因碳纖維比例越多，對數衰減率值越大，亦說明手腕部位吸收較多之振動波能量。

三、各種實驗拍之反彈球速比方面

纖維角度 30 度相較於 22 度有較大之反彈球速比；而纖維含碳比例越多，反彈球速比越大。

總合球拍柄、手腕部位與反彈球速的資料，可以歸納出三者之間的關係，即是：當網球拍受到相同之撞擊力作用時，球拍含碳纖維比例越多，所引起球拍結構體之最大振幅越小，因而有較快之反彈球速，但同時造成手腕之最大振幅越大，所以手腕部位之對數衰減率較大，亦表示手腕關節承受越多的負荷。

貳、建議

在現今網球運動科學的高度競爭環境中，不僅僅是技術與體能之比賽，更是運動器材的高度較量，藉由本研究得知網球拍纖維角度和

纖維比例對球拍結構體之擊球反應的影響，進而瞭解持拍手腕與球拍間相互影響的機轉，冀望能對網球運動科學提供實質的裨益，在此提出以下之建議：

- 一、身為一位職業網球運動員，應慎重選擇適合自己擊球類型的球拍，同時也須衡量身體負荷的能力範圍，例如發球上網型的選手較須藉助反彈球速，況且在一場比賽中擊球次數較少，因此可選用碳纖維含量較多的球拍；底線型的選手，在單場比賽中的擊球次數較多，因此則須衡量本身體能的狀況做決定，以避免過度負荷所帶來的運動傷害。
- 二、若僅以休閒為主要目的或從事網球運動時間較短之運動員，則可以選用纖維含碳比例較多的網球拍，以便能從擊球過程中，獲取較快之反彈球速，進而提升運動表現。
- 三、在網球拍之製作方面，採用纖維排列角度 22 度的疊層方式，對於使用者之安全性考量有較佳之反應；若是以球拍耐用性為出發點作考量，則纖維角度 30 度之疊層方式，對於球拍結構體之物性有較佳之表現。

引用文獻

一、中文部份

李春穎、許煙明和陳忠仁（1996）。材料科學與工程。台北市：高立圖書。

林寶城（1997）。網球拍振動特性分析。國立台灣師範大學博士論文。

相子元（1998）。有限元素法於運動器材之應用。中華民國體育學會體育學報，26，129-136。

張世聰、相子元（1998）。網球正反拍擊球振動對手臂之影響。中華民國體育學會體育學報，26，257-264。

陳帝佑（1998）。不同材質網球拍的振動及其影響控球能力之分析。國立體育學院碩士論文。

麥吉誠（1992）。網球演進史。網球報導雜誌，81，59-61。

蘇榮立（1996）。球拍勁度與網線張力對網球拍恢復係數及發球表現之影響。國立體育學院碩士論文。

蘇榮基（1999）。複合材料網球拍的製作與材料評估。大專體育學刊，2，167-181。

二、外文部份

- Baker, J., & Wilson, B. (1978). The effect of tennis racket stiffness and string tension on ball velocity after impact. Research Quarterly for Exercise and Sport, 49 (3) , 255-259.
- Baker, J., & Putnam, C.A. (1979). Tennis racket and ball responses during impact under clamped and freestanding conditions. Research Quarterly for Exercise and Sport, 50 (2) , 164-170.
- Brody, H. (1979). Physics of the tennis racket. American Journal of Physics, 47 (6) , 482-487.
- Brody, H.(1987). Models of tennis racket impact. International Journal of Sports Biomechanics, 3, 293-296.
- Brody, H. (1995). How would a physicist design a tennis racket? Physics Today, March, 26-31.
- Brody, H. (2000). An overview of racket technology. In S.J. Haake & A. Coe (Eds.), Proceedings of 1st International Congress of Tennis Science & Technology (pp.43-48). London: University of Surrey.
- Chen, T.Y., Chen, C.Y., Lin, D.C., & Huang, C.F. (2000). Vibration analysis of tennis racquet composite grips with ratios of carbon and glass fibres. In Y. Hong & D. P. Johns (Eds.), Proceedings of XVIII

International Symposium on Biomechanics in Sports (pp.630-632).
Hong Kong : The Chinese University of Hong Kong.

Cross, R. (2000). Dynamics of the collision between a tennis ball and a tennis racket. In S.J. Haake & A. Coe (Eds.), Proceedings of 1st International Congress of Tennis Science & Technology (pp.67-74). London: University of Surrey.

Elliot, B., Blanksby, B., & Ellis, R. (1980). Vibration and rebound velocity characteristics of conventional and oversized tennis rackets. Research Quarterly for Exercise and Sport, 51 (4) , 608-615.

Elliott, B. (1982a). The influence of tennis racket flexibility and string tension on rebound velocity following a dynamic impact. Research Quarterly for Exercise and Sport, 53 (4) , 277-281.

Elliott, B. (1982b). Tennis: the influence of grip tightness on reaction impulse and rebound velocity. Medicine and Science in Sports and Exercise, 14, 348-352.

Enoka, R.M. (1994). Neuromechanical Basis of Kinesiology (2nd ed.). IL: Human Kinetics. pp. 372-376.

Goodwill, S.R., Haake, S.J. (2000). Modelling the impact between a

- tennis ball and racket using rigid body dynamic. In S.J. Haake & A. Coe (Eds.), Proceedings of 1st International Congress of Tennis Science & Technology (pp.49-56). London: University of Surrey.
- Grabiner, M., Groppe, J., & Campbell, K. (1983). Resultant tennis ball velocity as a function of off-center impact and grip tightness. Medicine and Science on Sports and Exercise, 15 (6), 543-554.
- Groppel, J.L. (1986). The biomechanics of tennis : an overview. International Journal of Sport Biomechanics, 2, 141-155.
- Groppel, J.L., Shin, I.S., Thomas, J.A. & Welk, G.J. (1987). The effects of string type and tension on impact in midsize and oversize tennis racket. International Journal of Sport Biomechanics, 3, 40-46.
- Groppel, J.L. (1992). High Tech Tennis (2nd ed.). Champaign, IL: Leisure Press Inc. pp.15-27.
- Hatze, H. (1976). Force and during the tennis stroke. Medicine and science in sports, 8, 88-95.
- Hatze, H. (1993). The relationship between the coefficient of restitution and energy losses in tennis rackets. Journal of Applied Biomechanics, 9, 124-142.

- Hennig, E.M. (2001). Tennis racket biomechanics – an empirical approach. In J. R. Blackwell (Eds.), Proceedings of XIX International Symposium on Biomechanics in Sports (pp.21-24). San Francisco : University of. San Francisco
- Kawazoe, Y., & Yoshinari, K. (2000). Prediction of the impact shock vibrations of the player's wrist joint : comparison between two super large sized rackets with different frame mass distribution. In S.J. Haake & A. Coe (Eds.), Proceedings of 1st International Congress of Tennis Science & Technology (pp.91-99). London: University of Surrey.
- Kirk, R.E. (1995). Experimental Design: Procedures for the Behavioral Sciences (3rd ed.). NY: Brooks/Cole. pp.154-159.
- Missavage, R., Baker, J., & Putnam, C. (1984). Theoretical modeling of grip firmness during ball-racket impact. Research Quarterly for Exercise and Sport, 55(3), 254-260.
- Smith, W.F. (1994). Foundations of Materials Science and Engineering(2nd ed.). N.Y.: McGraw-Hill Inc.
- Toshihiko W., Yasuo I. & Mitsumasa M. (1979). The effect of grip firmness on ball velocity after impact. Medicine and Science in Sport, 11 (4) , 359-361.

Winter, D.A. & Patla, A.E. (1997). Signal Processing and Linear Systems for the Movement Sciences. Canada: Waterloo Biomechanics. pp.24-66.

附錄一：

纖維角度 22 度搭配 57%碳纖維球拍之撞擊測試資料

撞擊位置 次數	拍柄第一 峰值(g)	拍柄第二 峰值(g)	手腕第一 峰值(g)	手腕第二 峰值(g)	入球速 (m/s)	出球速 (m/s)	
中 心 撞 擊	1	148.58	66.40	26.89	3.66	27.89	9.23
	2	150.79	68.60	26.29	3.56	29.21	9.72
	3	147.97	64.74	27.17	3.98	28.87	8.48
	4	150.63	65.86	25.49	3.72	28.07	9.24
	5	150.02	67.53	27.98	2.89	28.38	8.36
	6	148.17	70.35	27.34	4.15	27.87	9.45
	7	145.70	65.68	27.55	3.73	28.16	9.22
	8	145.73	69.96	25.83	4.49	28.59	8.75
	9	146.22	69.78	26.33	3.40	27.15	9.29
	10	148.00	70.12	28.31	3.94	27.89	8.67
上 端 撞 擊	1	169.29	48.53	46.69	15.94	26.28	4.05
	2	168.25	46.02	46.32	12.49	27.04	3.20
	3	169.64	47.04	47.85	15.75	26.65	3.47
	4	172.60	50.24	45.72	15.47	27.18	2.94
	5	184.70	46.85	45.16	14.88	27.50	3.01
	6	186.26	50.67	49.02	15.69	27.53	2.39
	7	183.13	51.84	44.48	12.38	28.32	2.68
	8	173.06	48.95	49.05	15.05	28.38	3.00
	9	184.67	52.54	47.14	14.38	26.99	3.29
	10	168.90	52.00	49.89	16.56	27.13	3.02
下 端 撞 擊	1	196.38	100.85	35.81	15.98	29.68	10.34
	2	202.59	84.24	38.36	17.32	28.79	9.73
	3	206.99	98.67	38.29	15.21	28.43	9.18
	4	200.02	97.39	41.74	17.10	28.55	9.10
	5	198.29	101.68	38.19	16.14	30.41	9.25
	6	205.24	89.61	38.01	17.98	29.35	9.60
	7	194.72	87.85	43.69	19.74	28.43	9.22
	8	200.93	96.70	40.75	18.12	28.29	9.02
	9	197.27	85.59	40.58	19.92	29.17	9.22
	10	206.45	101.45	37.19	15.30	27.96	9.02

附錄二：

纖維角度 22 度搭配 71% 碳纖維球拍之撞擊測試資料

撞擊位置 次數	拍柄第一 峰值(g)	拍柄第二 峰值(g)	手腕第一 峰值(g)	手腕第二 峰值(g)	入球速 (m/s)	出球速 (m/s)	
中 心 撞 擊	1	138.15	69.10	23.65	5.14	28.03	8.94
	2	146.46	64.75	23.82	5.11	28.12	7.65
	3	152.60	66.20	24.31	2.68	28.47	8.97
	4	149.88	72.08	24.85	7.48	27.64	9.42
	5	145.52	69.77	25.31	2.66	28.38	9.02
	6	155.50	65.79	24.32	4.20	28.28	9.54
	7	152.33	70.98	23.88	5.18	28.36	9.88
	8	153.69	65.86	22.37	2.69	27.53	9.22
	9	152.63	78.75	24.21	3.70	27.83	9.11
	10	149.95	62.53	25.54	3.96	28.14	8.69
上 端 撞 擊	1	170.56	50.32	50.01	14.44	27.56	3.40
	2	165.79	52.49	53.72	15.94	26.90	2.32
	3	169.35	50.80	48.04	18.56	27.60	2.98
	4	189.45	49.15	53.45	23.78	26.70	2.89
	5	177.08	46.43	49.75	19.63	27.43	2.55
	6	200.07	53.88	48.38	12.87	27.85	3.02
	7	195.29	54.89	56.10	15.72	28.40	3.12
	8	197.60	48.25	60.29	27.40	28.49	4.00
	9	183.09	49.28	62.61	28.43	28.17	2.77
	10	175.82	50.55	54.98	22.94	28.08	3.21
下 端 撞 擊	1	203.83	110.47	38.34	22.06	28.67	7.88
	2	218.09	128.67	44.99	32.15	28.93	10.03
	3	233.17	141.46	42.91	17.66	27.42	11.81
	4	217.20	111.49	39.57	25.02	26.25	9.62
	5	228.27	103.98	44.66	23.40	28.78	11.13
	6	212.41	133.66	38.93	20.79	28.67	10.27
	7	210.83	121.36	40.62	23.44	28.39	9.67
	8	216.12	112.99	34.76	23.80	28.84	9.74
	9	209.63	118.79	39.74	23.63	27.96	10.21
	10	212.78	124.57	36.20	19.19	27.69	10.64

附錄三：

纖維角度 22 度搭配 86% 碳纖維球拍之撞擊測試資料

撞擊位置 次數	拍柄第一 峰值(g)	拍柄第二 峰值(g)	手腕第一 峰值(g)	手腕第二 峰值(g)	入球速 (m/s)	出球速 (m/s)	
中 心 撞 擊	1	161.40	72.58	24.46	4.89	27.51	8.67
	2	160.60	72.51	23.83	4.18	29.55	8.38
	3	166.64	72.25	24.46	4.92	28.49	8.63
	4	157.81	70.55	24.81	4.74	28.20	8.91
	5	160.53	67.80	24.77	4.71	28.48	9.03
	6	157.76	72.36	25.21	3.50	28.75	9.24
	7	163.24	71.95	23.98	4.64	28.23	9.36
	8	153.82	73.10	24.85	5.14	28.58	8.58
	9	157.64	71.85	25.40	4.91	28.29	8.77
	10	160.47	71.76	26.55	4.90	27.78	8.85
上 端 撞 擊	1	209.23	54.09	54.74	13.28	27.77	3.35
	2	210.87	50.17	58.40	14.01	27.57	5.10
	3	198.41	60.25	57.55	13.13	26.90	4.20
	4	211.25	60.52	58.54	12.09	25.82	3.80
	5	210.02	57.16	54.28	13.65	27.99	4.02
	6	203.27	49.05	53.32	14.56	28.28	3.66
	7	206.32	56.97	59.49	14.82	28.38	3.23
	8	209.36	55.30	56.16	13.91	27.83	2.89
	9	195.70	60.18	58.13	11.36	28.53	3.15
	10	212.17	61.14	57.42	12.35	28.69	2.79
下 端 撞 擊	1	204.46	145.94	39.87	22.37	27.94	9.96
	2	201.84	151.33	38.59	20.07	29.13	10.89
	3	204.41	142.58	40.58	21.50	29.64	10.13
	4	209.62	152.24	40.99	24.02	28.58	10.44
	5	214.84	150.55	45.34	29.06	29.18	10.13
	6	219.35	150.35	46.17	24.23	28.68	10.23
	7	216.35	146.95	43.81	25.34	28.50	9.79
	8	210.55	158.83	38.09	21.33	28.57	9.56
	9	218.81	150.28	41.86	20.59	29.12	11.18
	10	215.32	148.35	40.58	22.57	28.23	10.33

附錄四：

纖維角度 22 度搭配 100% 碳纖維球拍之撞擊測試資料

撞擊位置 次數	拍柄第一 峰值(g)	拍柄第二 峰值(g)	手腕第一 峰值(g)	手腕第二 峰值(g)	入球速 (m/s)	出球速 (m/s)	
中 心 撞 擊	1	147.52	82.75	28.83	2.70	28.34	9.75
	2	153.04	85.87	29.08	3.09	27.14	9.92
	3	154.90	79.77	27.96	3.62	28.46	9.75
	4	155.97	84.00	29.84	3.04	28.09	9.44
	5	158.37	84.07	30.10	4.00	28.06	9.66
	6	150.45	79.37	30.87	3.67	28.68	9.36
	7	159.43	84.32	27.77	3.18	28.39	9.29
	8	158.55	77.16	28.61	3.61	29.26	9.19
	9	160.24	77.69	27.28	3.68	28.33	9.20
	10	158.72	80.58	28.70	3.94	28.23	8.86
上 端 撞 擊	1	187.57	39.03	57.43	14.59	26.36	3.28
	2	202.87	39.84	52.45	13.30	27.37	4.93
	3	206.12	38.57	58.09	15.09	27.65	4.63
	4	205.18	34.04	56.60	14.77	25.94	4.64
	5	195.72	35.55	55.28	15.93	25.80	4.70
	6	203.17	40.55	55.26	15.25	27.88	3.83
	7	187.68	41.37	59.21	16.19	27.75	3.58
	8	194.96	42.25	58.27	18.70	28.31	4.28
	9	191.31	35.49	55.62	12.74	27.27	3.85
	10	200.84	34.47	53.37	13.69	26.43	4.16
下 端 撞 擊	1	230.61	138.81	35.92	23.65	29.00	9.66
	2	231.76	145.65	35.42	22.46	28.67	10.08
	3	229.57	151.54	37.45	24.48	28.23	9.61
	4	243.54	138.82	33.65	22.19	27.60	10.15
	5	226.15	143.85	36.42	23.78	27.40	10.02
	6	236.86	146.02	32.88	21.70	27.90	11.26
	7	237.40	131.15	31.60	21.59	28.49	11.08
	8	233.25	135.56	35.26	23.95	28.29	10.85
	9	235.63	135.13	36.40	25.36	28.73	10.76
	10	230.77	145.52	35.20	23.80	29.17	10.49

附錄五：

纖維角度 30 度搭配 57% 碳纖維球拍之撞擊測試資料

撞擊位置 次數	拍柄第一 峰值(g)	拍柄第二 峰值(g)	手腕第一 峰值(g)	手腕第二 峰值(g)	入球速 (m/s)	出球速 (m/s)	
中 心 撞 擊	1	165.56	75.05	25.17	7.00	26.51	9.27
	2	167.61	79.27	25.09	6.37	27.15	8.14
	3	164.92	76.29	24.90	7.06	26.77	8.04
	4	167.92	83.36	24.58	6.32	27.16	8.75
	5	165.08	75.33	24.09	6.66	28.14	8.23
	6	160.92	78.65	24.17	7.39	28.69	9.23
	7	165.29	75.11	26.48	7.13	28.24	8.78
	8	160.74	71.97	24.48	7.48	29.25	8.53
	9	165.07	75.66	24.54	6.77	28.59	9.27
	10	160.39	78.02	25.39	7.77	28.23	8.98
上 端 撞 擊	1	156.38	65.27	46.00	10.24	27.01	4.70
	2	154.14	59.58	46.56	14.22	27.32	2.90
	3	150.87	68.87	44.24	12.74	28.19	4.48
	4	143.84	63.79	47.44	12.40	27.77	3.22
	5	153.29	67.70	46.24	11.07	26.79	4.63
	6	152.57	71.35	49.26	13.60	28.26	3.47
	7	145.34	70.63	46.99	14.16	28.58	3.29
	8	157.48	63.28	44.97	14.13	28.48	2.69
	9	153.87	67.84	49.90	14.51	28.56	2.96
	10	147.68	69.26	47.91	15.07	28.47	3.33
下 端 撞 擊	1	202.26	82.56	39.55	18.65	27.02	9.95
	2	205.75	84.17	40.71	19.45	28.16	9.92
	3	214.30	90.78	38.57	19.66	27.76	9.69
	4	233.40	90.65	37.86	21.06	26.92	9.76
	5	212.57	90.40	44.40	20.10	28.07	9.80
	6	213.65	97.88	38.24	16.13	28.37	9.23
	7	207.79	87.86	38.60	21.55	27.98	9.28
	8	205.32	82.86	36.86	15.82	29.22	8.79
	9	211.09	82.88	40.20	20.45	28.36	8.59
	10	216.76	89.34	37.73	19.98	28.36	9.35

附錄六：

纖維角度 30 度搭配 71% 碳纖維球拍之撞擊測試資料

撞擊位置 次數	拍柄第一 峰值(g)	拍柄第二 峰值(g)	手腕第一 峰值(g)	手腕第二 峰值(g)	入球速 (m/s)	出球速 (m/s)	
中 心 撞 擊	1	152.58	74.64	23.62	5.32	28.16	9.72
	2	148.61	79.44	24.75	3.57	25.67	8.69
	3	157.44	73.99	24.59	3.59	28.45	9.61
	4	154.20	74.25	25.13	5.78	27.68	7.68
	5	156.52	73.73	26.83	3.68	28.35	8.89
	6	151.52	73.40	27.34	4.65	28.23	7.27
	7	154.14	71.51	25.25	4.88	27.90	8.25
	8	149.30	77.64	24.28	5.82	28.39	9.29
	9	155.82	73.97	25.21	6.06	29.21	9.20
	10	148.34	78.59	24.49	3.80	28.13	8.28
上 端 撞 擊	1	175.55	43.23	52.22	16.21	28.83	3.89
	2	175.97	38.55	47.70	18.54	28.27	3.67
	3	180.32	43.65	53.07	17.90	27.85	3.45
	4	173.74	36.62	51.96	17.79	27.65	2.90
	5	178.98	48.22	54.89	15.73	28.39	2.79
	6	177.26	41.97	51.01	15.78	27.38	3.43
	7	171.08	48.61	56.68	18.63	27.77	3.23
	8	185.65	38.84	52.87	19.31	28.43	3.15
	9	165.23	41.44	58.78	17.04	28.23	3.67
	10	176.69	48.34	54.92	17.65	28.93	3.13
下 端 撞 擊	1	225.58	94.28	37.35	20.71	25.68	8.25
	2	228.42	94.85	34.94	20.62	27.62	10.35
	3	227.15	100.15	36.65	20.20	27.68	9.50
	4	229.76	101.27	34.28	18.11	27.34	10.42
	5	235.65	94.44	37.87	23.50	28.12	10.42
	6	230.78	94.43	37.81	21.45	28.74	10.37
	7	235.78	105.97	39.72	24.23	28.27	9.46
	8	233.26	92.87	37.45	21.31	28.53	9.25
	9	232.66	99.65	39.34	24.78	29.26	9.39
	10	229.08	93.92	37.64	22.82	28.24	9.24

附錄七：

纖維角度 30 度搭配 86% 碳纖維球拍之撞擊測試資料

撞擊位置 次數	拍柄第一 峰值(g)	拍柄第二 峰值(g)	手腕第一 峰值(g)	手腕第二 峰值(g)	入球速 (m/s)	出球速 (m/s)	
中 心 撞 擊	1	145.58	70.10	21.98	6.73	28.45	8.86
	2	146.94	68.30	23.83	8.73	28.79	8.26
	3	142.89	70.69	25.76	7.46	29.27	7.73
	4	153.32	75.25	25.84	6.34	28.95	7.98
	5	144.98	72.35	24.78	7.80	28.22	8.45
	6	145.74	78.86	26.01	7.44	27.78	8.57
	7	139.78	72.28	25.50	8.42	27.56	8.23
	8	151.74	77.12	24.36	7.51	28.89	7.84
	9	150.74	78.69	22.90	8.22	28.37	9.28
	10	153.58	73.47	25.67	5.68	28.78	8.78
上 端 撞 擊	1	185.67	42.22	54.34	21.58	28.36	3.82
	2	184.92	46.31	55.19	19.50	28.52	3.69
	3	190.09	41.82	52.17	17.15	28.74	3.78
	4	190.71	35.41	50.69	21.02	28.66	4.29
	5	190.05	39.38	51.86	16.06	28.76	4.62
	6	193.82	42.64	53.96	18.16	28.21	4.63
	7	186.75	40.30	52.07	17.82	29.22	4.19
	8	186.03	42.45	55.59	24.30	28.31	4.38
	9	181.60	43.35	55.37	18.93	27.89	4.13
	10	192.55	39.90	51.74	21.01	28.04	3.98
下 端 撞 擊	1	212.62	125.60	43.51	22.88	28.38	10.58
	2	216.06	121.15	40.38	20.56	28.89	9.83
	3	221.92	114.55	41.28	23.77	28.76	9.79
	4	212.72	115.15	44.64	23.46	29.20	10.80
	5	215.65	112.99	39.00	20.42	28.70	10.36
	6	215.77	113.91	46.58	23.74	28.68	10.79
	7	210.85	122.17	40.10	23.61	27.63	11.13
	8	218.80	112.69	45.01	24.49	28.59	10.57
	9	227.01	122.28	41.00	24.13	28.98	10.35
	10	213.92	118.95	40.28	24.83	29.00	10.63

附錄八：

纖維角度 30 度搭配 100% 碳纖維球拍之撞擊測試資料

撞擊位置 次數	拍柄第一 峰值(g)	拍柄第二 峰值(g)	手腕第一 峰值(g)	手腕第二 峰值(g)	入球速 (m/s)	出球速 (m/s)	
中 心 撞 擊	1	150.88	84.19	24.11	2.79	28.49	9.35
	2	146.11	78.34	25.57	4.34	29.12	9.18
	3	144.30	75.96	24.81	3.91	28.85	9.29
	4	141.37	73.08	26.12	3.47	28.68	9.03
	5	140.34	79.51	27.35	3.37	28.46	9.39
	6	147.03	78.67	26.20	3.59	27.85	8.79
	7	143.26	76.96	27.35	3.46	28.39	8.56
	8	140.93	75.85	27.48	2.99	28.88	8.38
	9	148.57	78.35	26.38	4.24	29.03	9.27
	10	149.75	81.05	26.51	3.32	28.78	9.17
上 端 撞 擊	1	208.29	37.85	52.69	18.88	28.89	4.83
	2	194.12	36.60	54.30	15.51	29.37	4.22
	3	195.06	30.13	58.55	17.91	27.88	4.58
	4	200.89	36.39	54.58	15.90	27.53	4.83
	5	200.53	40.13	52.28	19.23	28.37	4.20
	6	196.34	36.35	56.90	19.66	28.74	4.74
	7	202.55	33.07	50.67	17.72	28.72	4.29
	8	204.71	47.67	54.52	18.60	28.73	3.88
	9	185.01	56.07	57.06	19.23	29.33	4.32
	10	201.26	38.34	53.33	16.32	28.63	4.67
下 端 撞 擊	1	215.95	133.08	41.38	18.26	28.69	11.78
	2	220.92	132.76	38.71	17.22	28.57	11.90
	3	218.22	140.57	38.86	18.82	28.99	11.25
	4	220.78	143.90	40.81	17.53	29.13	12.50
	5	215.88	127.87	42.24	18.24	29.32	12.02
	6	220.36	138.45	38.61	18.82	28.69	11.13
	7	225.98	124.68	42.29	20.49	28.45	10.90
	8	217.31	139.98	40.91	20.28	28.76	11.26
	9	224.83	125.28	42.87	18.18	28.93	11.78
	10	219.92	130.65	40.77	21.36	28.29	12.11